

HISTOIRE DES IDÉES

ET DES

RECHERCHES SUR LE SOLEIL.

Extrait de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* *pour* 1907.

HISTOIRE DES IDÉES

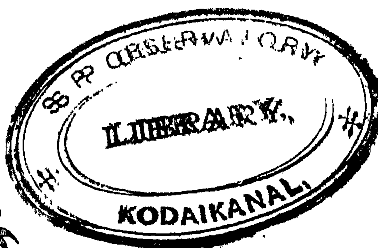
ET DES

RECHERCHES SUR LE SOLEIL,

RÉVÉLATION RÉCENTE
DE L'ATMOSPHÈRE ENTIÈRE DE L'ASTRE,

Par H. DESLANDRES.





PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1906



TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE II.

Recherches sur la surface du Soleil avec la simple lunette ordinaire.

CHAPITRE III.

Analyse spectrale et photographie. Application à la surface et au rayonnement de l'astre.

CHAPITRE IV.

Révélation par les éclipses de l'atmosphère et de ses trois couches principales au bord solaire extérieur.

Pages.

CHAPITRE V.

Étude de la couche moyenne en dehors des éclipses et au bord extérieur.

CHAPITRE VI.

Révélation en temps ordinaire des couches basse et moyenne, dans la demi-sphère entière tournée vers la Terre.



HISTOIRE DES IDÉES

ET DES

RECHERCHES SUR LE SOLEIL,

RÉVÉLATION RÉCENTE
DE L'ATMOSPHÈRE ENTIÈRE DE L'ASTRE.

INTRODUCTION.

Le Soleil est peut-être le plus beau sujet d'études qui s'offre à l'esprit humain.

De tous les corps qui nous entourent, il est celui qui joue assurément le rôle le plus grand, celui qui exerce autour de lui l'action la plus puissante et la plus générale. Il est la source première de la vie et du mouvement sur cette terre, source à laquelle sont suspendus tous les êtres, et les végétaux comme les animaux. Suivant l'expression si juste du poète, il est le cœur du monde, du monde solaire tout au moins, puisqu'il distribue à tous les membres du système, à tous les organes, la chaleur et l'énergie ([1]).

([1]) Le Soleil a été célébré dans tous les temps et dans toutes les langues, et l'auteur de cette Notice fait une collection de tous les beaux vers inspirés par le

L'omnipotence du Soleil éclate pour les yeux les plus bornés; elle est évidente pour le sauvage comme pour le philosophe, et, à toutes les époques, l'homme a tourné ses pensées vers le Soleil, avec le désir intense de le connaître à fond, et de déterminer non seulement les lois de son mouvement dans le ciel, mais encore sa véritable nature, sa constitution intime, les causes premières de sa chaleur et de sa lumière, et de leur permanence en quelque sorte indéfinie.

Soleil. La collection est intéressante, car le poète exprime avec force les idées courantes de son époque, et souvent les dépasse. Les strophes suivantes d'un poème lu devant la Société astronomique, à la fête du Soleil du 21 juin 1904, sont dues au poète Jean Rameau :

Au nom de la Lumière, au nom du ciel immense,
Au nom de l'astre jaune, Arcturus le charmeur
Au nom de l'astre blanc, Sirius qui commence ;
Au nom de l'astre rouge Aldébaran qui meurt !

O Soleil, astre blond, père ardent des neuf terres,
Roi doré des cieux bleus qu'honorent les couchants,
Toi qu'escorte le chœur des globes tributaires
Et que suit l'œil pieux des fleurettes des champs

Toi le creuset géant où bout l'âme des mondes,
Toi le cœur formidable et ruisselant de jour,
Qui propulses vers nous, par explosions blondes
Toute la vie et tout l'espoir et tout l'amour.

Les strophes sont animées d'un beau souffle ; elles montrent que la masse du public est pénétrée maintenant par nos idées modernes sur le rôle du Soleil et sur l'évolution des étoiles.

Mais le Soleil est extrêmement loin ; et la vue humaine, si bien adaptée à nos besoins pour les objets rapprochés, devient tout à fait insuffisante, aux énormes distances des corps célestes, au moins lorsqu'elle est réduite à elle-même, à ses propres moyens. De plus, le Soleil a une forme géométrique régulière, une grandeur et une constance d'éclat que ne possèdent pas les lumières terrestres. Le problème est extrêmement difficile ; et, si la première partie est abordable jusqu'à un certain point avec l'œil seul, la seconde partie, ou l'étude physique du Soleil, est inacessible pour l'homme qui ne dispose que des sens à faible portée fournis par la nature, et de l'expérience acquise dans la vie courante.

Cependant, dans la période moderne, l'invention des lunettes, les découvertes successives sur les propriétés de la matière, sur ses manifestations lumineuses, électriques et autres et, pour tout dire, l'extraordinaire développement de toutes les sciences, ont fourni à l'homme des moyens d'investigation d'une puissance croissante. Après de longs efforts, il est arrivé à soulever un coin du voile et à acquérir quelques notions justes non seulement sur les mouvements de l'astre, mais sur sa véritable nature.

L'histoire des idées et des recherches sur le Soleil est instructive ; elle est exposée brièvement dans cette Note, une part plus grande étant faite à l'étude physique de l'astre, et en particulier à des découvertes récentes sur son

atmosphère entière. Mais, dans l'étude physique, à cause du cadre étroit de cet Annuaire, on a dû abréger beaucoup les études sur le rayonnement et la température de l'astre ([1]), et l'on s'est étendu avec quelques détails seulement sur les formes, les mouvements, l'état physique, la composition chimique et les variations de la matière qui forme la surface de l'astre et les trois couches atmosphériques. Cet ensemble a été divisé en six Chapitres, les trois premiers étant consacrés aux mouvements généraux et à la surface, et les trois autres à l'atmosphère.

Enfin, d'une manière générale, l'auteur de cette Notice a présenté simplement les faits et résultats acquis avec leur enchaînement naturel, sans trop chercher à remonter aux causes ou à présenter une explication générale des phénomènes. Cet autre côté de la question, qui n'est pas le moins séduisant, sera exposé dans une Note ultérieure.

([1]) Le rayonnement et la température fourniront aisément la matière d'une Note spéciale fort intéressante. D'ailleurs, les recherches sur le rayonnement total ont pris récemment une grande extension; et, avant de les exposer, il convient d'attendre qu'elles aient porté tous leurs fruits.

CHAPITRE I.

RECHERCHES SUR LES MOUVEMENTS GÉNÉRAUX. — FORCES ATTRACTIVES ET RÉPULSIVES ÉMANÉES DE L'ASTRE.

Premières découvertes dues aux Chaldéens. — Les premiers hommes ont eu naturellement du Soleil la conception qui est la plus simple ; ils ont vu en lui un Être surnaturel, d'essence vraiment supérieure, et l'ont adoré comme une divinité bienfaisante. C'est pourquoi les premiers observatoires ont été des temples, dont les prêtres, consacrés au Soleil, assumaient la charge d'observer et d'annoncer les mouvements généraux de l'astre, et leur accord avec les périodes de la végétation. Ces observations anciennes, transmises de génération en génération et conservées dans la caste des prêtres, ont donné d'ailleurs des résultats qui sont remarquables. Quatre mille ans avant notre ère, les Chaldéens ont reconnu les mouvements généraux du Soleil et de la Lune par rapport aux étoiles, et les grands cercles qu'ils décrivent autour de la Terre sur la sphère céleste. Ils ont posé des règles simples pour la prédiction des éclipses de Soleil et de Lune, règles qui sont encore utilisées de nos jours.

Or, à toutes les époques, les éclipses, celles du Soleil surtout, ont été considérées comme des phénomènes extraordinaires : elles ont

excité successivement la terreur, une très vive curiosité, et enfin, comme aujourd'hui, l'intérêt qui s'attache à une chose à la fois belle et utile; leur prédiction, même incomplète (comme elle l'était dans l'antiquité), a toujours fait grand honneur aux astronomes.

Les Chaldéens ont aussi reconnu, au moins grossièrement, un caractère primordial de ces mouvements qui implique leur complexité, et qui est l'inégalité des chemins successifs parcourus en 24 heures par la Lune et le Soleil sur la sphère céleste. Mais le relevé précis de ces inégalités et la découverte de leurs causes sont très difficiles et ont arrêté les astronomes pendant de longs siècles. Le problème, qui se relie évidemment d'une manière étroite à la prédiction des éclipses, n'a été résolu complètement que dans la première moitié du XIX[e] siècle; et c'est seulement depuis cette époque rapprochée que l'on sait prédire exactement, sinon la date des éclipses, au moins la trace exacte du cône d'ombre de la Lune sur la Terre.

Astronomie grecque. — L'astronomie des Grecs nous est mieux connue, grâce au livre de l'Ecole d'Alexandrie, l'*Almageste* (140 ans après Jésus-Christ), qui, par les Arabes, est parvenu jusqu'à nous; mais, dans ce qui va suivre, il sera question surtout des idées et résultats sur le Soleil, qui forment le sujet principal de cette Notice.

Le grand mérite des Grecs a été d'organiser

des appareils et des calculs spéciaux pour la mesure des angles ; ce qui leur a permis de reconnaître des détails plus faibles et des inégalités plus petites dans le mouvement des astres. Mais, d'autre part, si l'on excepte Pythagore et ses élèves, ils ne se sont pas élevés au-dessus des premières apparences, et de la conception timide et étroite qui ramène tout à la Terre et en fait le pivot et le centre du Monde.

Dans leur système cosmogonique, appelé souvent *système de Ptolémée* du nom de l'auteur de l'*Almageste,* le Soleil, les planètes et les étoiles tournent autour de la Terre, et le Soleil est un satellite, au même titre que la Lune. Ils ignoraient, il est vrai, la distance énorme des étoiles, et ils estimaient la distance du Soleil vingt fois plus faible qu'elle n'est en réalité, et donc le volume de l'astre 8000 fois plus petit que le volume réel.

Leurs idées sur la nature même du Soleil n'étaient pas plus larges. Si le Soleil n'était plus d'essence divine, il avait encore des qualités et une perfection que les corps terrestres ne peuvent atteindre. Le Monde était divisé par eux en deux parties, la partie sublunaire où les propriétés sont celles des corps terrestres, et la partie extralunaire, céleste, où l'éclat des corps est toujours constant, où la courbe circulaire, parfaite entre toutes, est la règle ; c'est ainsi que le Soleil a nécessairement une forme circulaire, et aussi, comme les étoiles, un mouvement circulaire et uniforme. Pour expli-

quer les inégalités solaires, l'école d'Alexandrie et Ptolémée ont dû supposer que le cercle décrit par le Soleil était un peu excentrique à la Terre. Cette hypothèse du mouvement circulaire, uniforme et excentrique, relativement simple pour le Soleil, conduit, comme on sait, à de grandes complications pour les planètes.

Copernic et Képler. Mouvement elliptique des planètes. — Le système de Ptolémée, qui, sur les points principaux, est semblable à celui d'Aristote, a prévalu pendant quatorze siècles; il a fallu, pour l'abattre définitivement, une longue série d'efforts, de Copernic à l'école moderne.

Copernic (1473-1543) n'a pas fait d'observations spéciales; mais il a soutenu avec énergie que la Terre devait tourner autour d'un de ses diamètres, et décrire en même temps, comme les planètes, une courbe fermée autour du Soleil; car cette hypothèse explique les faits au moins aussi bien que la précédente et, de plus, est beaucoup plus simple. Ces idées n'ont pas été acceptées sans conteste; elles se sont imposées à tous plus tard par les vérifications que fournissent l'aberration de la lumière (Bradley, 1726) et la parallaxe des étoiles (Bessel, 1838).

Tycho-Brahé (1546-1601), avec des appareils qui ne comportaient pas de lunettes, a accumulé les mesures de position, précises ou relativement précises, pour le Soleil et les planètes. Ses observations ont fourni une base solide aux

recherches et aux calculs de Képler sur la courbe exacte décrite par les planètes autour du Soleil. Képler montre que les cercles excentriques de Ptolémée, décrits avec une vitesse uniforme, ne sont pas conciliables avec les observations, et, après 12 ans d'efforts, il arrive aux lois connues de tous, qui portent son nom: les planètes et la Terre ne décrivent pas des cercles, mais des ellipses dont le Soleil occupe un des foyers, les aires décrites par le rayon vecteur de la planète étant proportionnelles au temps.

Cette découverte mémorable de Képler (1620) marque la seconde étape dans la reconnaissance des mouvements réels ou apparents des planètes et du Soleil.

Newton. Explication des mouvements par l'attraction universelle. Distance et masse du Soleil. — Cinquante ans plus tard, Newton montre que le mouvement elliptique de Képler implique une force attractive dirigée de la planète vers le Soleil, et finalement il arrive à la grande loi de l'attraction universelle, énoncée à peu près dans ces termes : Tout se passe comme si les corps et les dernières particules de ces corps s'attirent proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré des distances.

Au même moment, Cassini, en France, réalise la première mesure assez précise (à $\frac{1}{10}$ près) de la distance de la Terre au Soleil; la distance

trouvée est plus grande que dans toutes les mesures précédentes, et les nombres qui s'en déduisent pour la surface et le volume sont relativement encore plus élevés. La valeur de la distance, portée dans les formules de Newton, permet de calculer la masse du Soleil, qui est énorme (plus de 300 000 fois celle de la Terre). D'autre part, la densité moyenne, déterminée plus tard, a été trouvée relativement faible, et égale à 1,4, la densité de l'eau étant prise pour unité.

La loi newtonienne définit simplement la direction et la grandeur d'un lien nouveau invisible qui réunit tous les corps et dont la pesanteur terrestre n'est qu'un cas particulier; mais elle ne révèle pas la nature physique et la cause première de ce lien, qui restent à déterminer.

Sur quelques conséquences de la loi newtonienne. — Cette loi a donné la clef d'un grand nombre de phénomènes, jusqu'alors inexpliqués; il suffira, pour le but spécial de cette Notice, d'exposer les conséquences qui se rapportent à la prédiction précise des éclipses, au rôle et à la forme géométrique du Soleil.

Le mouvement elliptique de Képler n'est pas le mouvement réel, beaucoup plus complexe; il n'est qu'une première approximation, et l'on s'en est aperçu rapidement avec les mesures de position beaucoup plus précises que permet l'emploi des lunettes. Or, l'application intégrale

de la loi de Newton explique et prévoit cette anomalie. Le Soleil et la planète décriraient chacun une ellipse autour de leur centre de gravité commun, s'ils étaient seuls; mais les autres planètes, les autres corps du système, ajoutent leur attraction et modifient le mouvement simple primitif. Le calcul de toutes ces actions, ou perturbations, très long et très difficile, rentre dans une branche spéciale de l'Astronomie, la Mécanique céleste, qui fleurit depuis deux cents ans ; or, l'accord de ces calculs avec l'observation a été trouvé parfait. Ces résultats, complètement dégagés, au siècle dernier, forment la troisième et dernière étape dans la connaissance des mouvements intérieurs du système solaire [1].

Les travaux précédents ont conduit à l'établissement de Tables spéciales qui donnent, à tout instant, dans le passé et dans l'avenir, la position exacte de la Lune et du Soleil ; et c'est grâce à elles que l'on peut aujourd'hui prédire avec précision les éclipses dans leurs moindres détails.

D'autre part, le rôle prépondérant du Soleil dans notre système se comprend aisément avec la loi de Newton ; il est dû à l'énormité de sa masse comparée à celle des planètes, et à l'at-

---

[1] Cependant de petites anomalies du mouvement de Vénus et Mercure n'ont pas été expliquées, et cette étape n'est peut-être pas la dernière. La loi de Newton elle-même a ses limites.

traction qui en résulte. Le Soleil tient les planètes sous sa dépendance non seulement par l'énergie rayonnante qu'il leur envoie, mais par le mouvement spécial qu'il leur impose.

Enfin, la forme sphérique des astres, qui a si fort étonné les philosophes de l'antiquité, s'explique aussi facilement ; elle est simplement la forme d'équilibre d'une masse gazeuse ou liquide, soumise à ses attractions mutuelles. La sphère est la forme des gouttes liquides isolées, des masses liquides plongées dans un autre liquide non miscible et de même densité.

Si la sphère liquide est en rotation, elle s'aplatit aux pôles, et c'est ainsi que les planètes et la Terre en particulier ont pris autrefois la forme aplatie qu'elles ont conservée.

Force répulsive émanée de l'astre. -- L'attraction newtonienne explique la structure générale du système solaire, et règle la disposition des masses principales ; or, il faut lui opposer une autre force, récemment reconnue, qui est, au contraire, répulsive, et qui règle la disposition des très petites masses, des particules, dans le système solaire. Cette force est la pression de radiation, ou la pression qu'un rayonnement lumineux quelconque exerce sur les corps, et qui est proportionnelle à son intensité. Cette pression répulsive, indiquée d'abord dans les équations de Maxwell, a été reconnue expérimentalement dans ces dernières années par Lebedew, Nichols, Hull et Poynting.

Elle est proportionnelle non plus à la masse du corps frappé, mais à sa surface, et est naturellement en raison inverse du carré des distances. Très faible en réalité, elle n'agit pas d'une manière appréciable sur les corps d'un diamètre un peu grand; mais, si le corps est une particule suffisamment petite, elle peut égaler ou dépasser l'attraction newtonienne, et les mouvements sont alors tout autres.

Cette force répulsive, dont la nature est beaucoup mieux connue que celle de l'attraction, explique bien les queues cométaires, et les formes rayonnantes de l'atmosphère solaire supérieure dont il sera question dans les Chapitres suivants.

CHAPITRE II.

RECHERCHES SUR LA SURFACE DU SOLEIL AVEC LA SIMPLE LUNETTE ORDINAIRE.

Importance de l'invention des lunettes. — Le XVII[e] siècle se distingue brillamment de ceux qui le précèdent par les découvertes fondamentales de Képler et de Newton ; or il a vu éclore une troisième découverte, d'un autre ordre, mais d'une importance au moins égale, qui est l'invention des lunettes, et qui même précède de plusieurs années les deux autres, mais sans avoir exercé sur elles une influence appréciable.

L'invention des lunettes ouvre une ère nouvelle en Astronomie. Le principal obstacle à l'étude des astres est leur éloignement que la lunette réduit justement dans de larges proportions. L'œil, comme on sait, est lui-même une petite lunette, longue de 20^{mm} ; le cristallin est sa lentille et forme une image de l'objet sur la rétine, exactement comme sur le verre dépoli d'un appareil photographique. Inversement, une lunette peut être considérée comme un œil agrandi. Une lunette de 20^{m}, mille fois plus longue que l'œil, a, toutes choses égales d'ailleurs, une puissance mille fois plus grande (1).

(1) Il faut ajouter, toutes choses égales d'ailleurs, c'est-à-dire, les surfaces optiques étant de même

Appliquée aux observations de position, la lunette a accru largement leur précision; elle a permis de reconnaître, d'une part, les plus petites irrégularités dans le mouvement du Soleil et des planètes, et d'autre part les petits écarts des étoiles jusqu'alors considérés comme immuables sur la sphère céleste, et leur division fréquente en étoiles doubles ou multiples.

En Astronomie physique, son rôle est capital; on peut dire que l'étude physique du Soleil a commencé avec la lunette, et a progressé avec ses perfectionnements successifs en grandeur et en qualité.

Découverte des taches du Soleil. — C'est en 1610 que Galilée dirige le premier une lunette sur le Soleil; il découvre les taches, leur déplacement continu par rapport aux bords et donc la rotation de l'astre, qui, point important, a le même sens que la révolution des planètes autour du Soleil.

Cette première observation du Soleil a été pénible, a cause du grand éclat de l'astre que l'œil ne supporte pas sans dommage. Une petite lentille, comme on sait, allume à son foyer les corps combustibles ; si même la lentille est très

---

qualité, le rapport de l'ouverture à la longueur étant le même. Le cristallin de l'œil est une lentille imparfaite, qui a des défauts d'achromatisme et d'aplanétisme ; la vision est nette seulement lorsqu'on utilise la partie centrale du cristallin.

grande et de très court foyer, les substances les plus réfractaires fondent comme dans l'arc électrique. Or Galilée n'avait pas les verres colorés ou noircis, qui diminuent l'éclat de la lumière ; et il ne connaissait pas la méthode simple, employée couramment de nos jours, qui consiste à projeter l'image agrandie sur un écran. Il est mort aveugle du fait d'avoir trop regardé le Soleil.

Premières discussions sur leur nature. — La priorité de la découverte des taches lui a été contestée, mais il a eu tout au moins le mérite de prouver le premier que la tache est liée au Soleil et est partie intégrante de sa surface. Ses adversaires l'attribuaient à de petites planètes nouvelles circulant autour du Soleil; ils étaient imbus des préjugés anciens sur la perfection idéale du Soleil, et répugnaient à l'idée qu'il pût être terni. Le Soleil est l'œil du monde, disait Jean de Tarde, et l'œil du monde ne peut souffrir d'une ophthalmie.

Une fois le fait bien établi, une nouvelle discussion commence sur la nature même de la tache, sur les causes qui produisent cet obscurcissement local, divisé en deux parties distinctes, l'ombre et la pénombre. Les uns attribuent la tache à un nuage de condensation, les autres à une scorie. Galilée penchait pour le nuage, mais chacun resta sur ses positions. Cette discussion est intéressante surtout parce qu'elle montre l'orientation nouvelle des esprits. L'astronome suit dès à présent la voie naturelle et

cherche à expliquer les faits solaires par des phénomènes terrestres bien connus et amplifiés seulement pour tenir compte de la masse énorme du Soleil et de sa température évidemment très élevée.

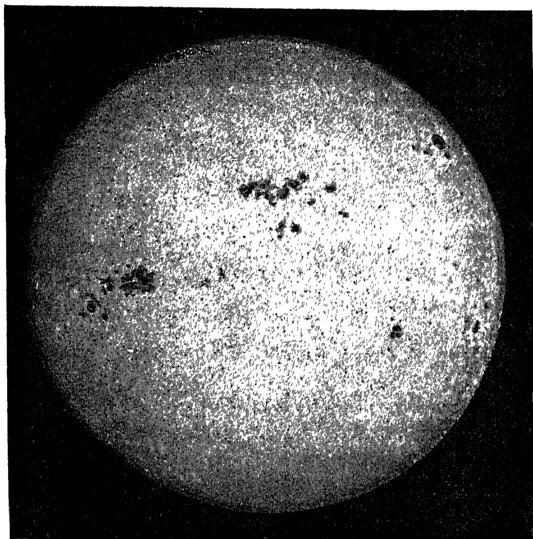
Cependant, il vaut mieux le dire de suite, la question posée dès le début est encore pendante, après trois cents ans d'observations. La nature et la cause des taches ne sont pas encore exactement connues, bien que les explications et les hypothèses n'aient pas manqué. L'étude continue des faits a seulement permis d'écarter beaucoup d'hypothèses inadmissibles, et de resserrer dans un cercle de plus en plus étroit les explications possibles.

La tache est d'ailleurs intimement liée aux phénomènes principaux de la surface et de l'atmosphère du Soleil ; et une discussion sérieuse de ses origines n'est possible qu'après une étude complète du Soleil entier.

Liaison des taches et facules. Importance plus grande des facules. — Les taches sont toujours plus voisines de l'équateur que des pôles; en général, elles sont confinées entre les parallèles de 5° et 30°; et leur durée, très variable, est comprise entre quelques jours et deux mois. De plus, et c'est là une des particularités les plus curieuses, la matière solaire qui entoure la tache est toujours plus brillante que le fond moyen de l'astre. La partie la moins brillante est ainsi toujours associée à une partie plus

brillante, appelée *facule*. Or, les facules sont beaucoup plus nombreuses que les taches, et

Fig. 1.



Soleil du 22 septembre 1870, d'après une photographie de Rutherford.

c'est au milieu d'une facule que la tache prend naissance, se développe et finalement disparaît. La facule la précède et lui survit ; elle repré-

sente donc un phénomène plus persistant, plus important que la tache ; et c'est sur elle qu'il convient surtout de porter ses efforts et ses recherches, quoique la tache, beaucoup plus facile à voir, attire d'abord l'attention.

La facule, en effet, n'est aisément visible qu'au bord de l'astre ; au centre, elle est masquée le plus souvent, surtout pour un œil qui n'est pas exercé. Ces différences sont indiquées à peu près dans la figure 1 ci-contre qui représente l'image du Soleil photographiée un jour où les taches étaient nombreuses. *Voir* aussi la figure 2.

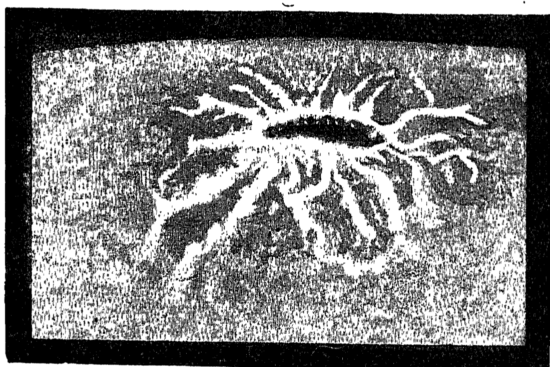
Après Galilée et la première curiosité provoquée par sa découverte, l'étude du Soleil et des taches fut à peu près délaissée pendant une longue période de 150 ans. Les taches, au premier abord tout au moins, sont très capricieuses ; elles apparaissent et disparaissent sans causes appréciables et ont les formes les plus irrégulières. Ces variations déroutaient les astronomes d'alors, habitués aux belles vérifications régulières de la Mécanique céleste. Ne vous attardez pas trop aux taches, disait Lalande à un jeune débutant, c'est un phénomène qui n'a pas de loi.

Les taches sont des cavités et les facules des élévations. — Il faut aller jusqu'à l'année 1776 pour constater un résultat nouveau sur le Soleil. Wilson annonce que les taches sont des cavités de la surface de l'astre ou photosphère ; car la pénombre opposée à l'un des bords supposé

voisin apparaît ou disparaît progressivement, selon que la tache s'éloigne ou s'approche de ce bord.

Ce fait curieux est en effet très net sur certaines taches, mais peu visible ou invisible

Fig. 2.



Facule et tache au bord du Soleil.

sur d'autres. On peut admettre que les taches sont des trous plus ou moins profonds de la surface solaire.

Peu après, Herschell, avec les grands télescopes qu'il construisait lui-même et qui sont les premiers grands instruments dirigés vers le

ciel, reconnaît que les facules correspondent au contraire à des élévations au-dessus de la surface moyenne. Elles montrent en effet souvent une saillie au bord solaire ; mais l'observation est difficile et exige un instrument d'ouverture notable, car la saillie est très faible.

Ces deux résultats, qui se complètent, sont fort intéressants ; ils décèlent les inégalités de la surface solaire qui s'accordent avec les inégalités d'éclat, aisément explicables par l'absorption plus ou moins forte de vapeurs interposées. La facule, qui est une élévation, ne ressemble pas en général aux chaînes de montagnes terrestres, formées de bandes parallèles. Elle est plutôt comparable à un cône d'éruption, duquel divergent des chaînons concentriques formant des lignes dentelées ; la tache en serait le cratère. *Voir* la figure 2 ci-dessus. Ce rapprochement avec les volcans terrestres a été fait par les premiers observateurs ; il correspond à une des explications les plus plausibles des taches solaires.

Structure granulée de la surface. — Herschell, avec son grand télescope, étudie aussi la structure de la surface moyenne, qui n'est pas continue ; avec un grossissement moyen, elle a l'aspect d'une peau d'orange, et, lorsque le grossissement augmente, elle apparaît formée de nodules brillants, plus tard appelés grains, qui se détachent sur un fond plus sombre. Les grains,

ronds, en général, sont souvent allongés près des taches, et forment des files bien distinctes dans la pénombre. Tous ces détails importent pour la reconnaissance de la nature de la surface.

Vitesse de rotation décroissante de l'équateur aux pôles. — A ces faits curieux on peut joindre un autre résultat fort intéressant sur la surface solaire, dû à Carrington (1853-1861). Il est de beaucoup postérieur et présenté sans souci de l'ordre chronologique.

La durée de rotation du Soleil, déterminée avec les taches, offrait des différences notables suivant les observateurs, et ces divergences étaient attribuées à l'irrégularité des taches, passée alors en axiome. Or Carrington montre que cette irrégularité suit en réalité une règle simple. La durée de rotation croît d'une manière continue, avec la latitude de la tache ; elle augmente de l'équateur aux pôles ; de 25 jours à l'équateur, elle est de 27,5 jours à la latitude de 45°. Cette loi curieuse de rotation, incompatible avec une surface solide, a été vérifiée par d'autres méthodes qui permettent d'affirmer qu'elle s'applique bien à la surface elle-même ; d'ailleurs, elle a été retrouvée, quoique beaucoup moins accentuée, sur la surface visible de la planète Jupiter.

Découverte de la périodicité des taches par Schwabe. — Les recherches précédentes, poursuivies dans les Observatoires pendant plus de

200 ans, ont donné des résultats fort intéressants, mais qui se rapportent surtout à des points de détails. Il était réservé à un simple amateur d'astronomie, Schwabe de Dessau, d'indiquer une loi simple et générale qui règle la distribution des taches dans le temps, et qui, même, étendue peu à peu, embrasse l'ensemble des phénomènes solaires.

Schwabe, qui disposait des moyens d'un amateur ordinaire, a relevé pendant 43 ans (de 1826 à 1869), avec une patience inlassable, les taches du Soleil, en profitant des loisirs que lui laissait sa profession d'apothicaire. En 1843, il annonce que les taches ont de grandes variations périodiques, avec une période voisine de 10 ans; et, en 1851, après avoir vérifié de nouveau le phénomène, il le présente avec une certitude nouvelle.

Certes une tache, prise isolément, est irrégulière, aussi irrégulière qu'une nuée de notre ciel, mais les taches considérées dans leur ensemble, sur une longue étendue de temps, présentent une régularité manifeste, comme il arrive pour la loi des grands nombres.

Pendant 3 ans, elles augmentent progressivement, restent stationnaires un an ou deux, puis diminuent pendant les 6 ou 7 années qui suivent, pour reprendre indéfiniment le même cycle de variations.

Au moment du maximum, la surface solaire offre toujours des taches dont le nombre est compris souvent entre 25 et 50. Au moment du

minimum, plusieurs semaines peuvent s'écouler sans qu'aucune tache apparaisse.

Rapprochement avec les étoiles variables. — Humboldt, frappé par la valeur de la découverte, se fit son champion auprès du monde savant (troisième Livre du *Cosmos*). Son importance est, en effet, considérable; elle laisse entrevoir que le Soleil n'a pas la constance de chaleur et de lumière admise jusqu'ici, mais qu'il est probablement une étoile variable. La courbe de variations des taches et la courbe des changements d'éclat des étoiles variables, ont d'ailleurs la même allure caractéristique; dans les deux cas, la croissance est plus courte que la décroissance.

La loi de Schwabe a été vérifiée depuis de toutes les manières; elle apparaît avec la même netteté, que l'on compte simplement les taches, ou que l'on mesure avec soin leur surface totale avec des appareils précis, comme on le fait à Greenwich depuis 40 ans. Wolff, de Zurich, a réuni toutes les observations, sur les taches, antérieures à 1850, éparses de tous les côtés, et a pu reconstituer leurs variations pendant près de 150 ans. La période n'est pas absolument constante, et sa valeur moyenne est de 11 ans $\frac{1}{10}$.

Accord général des variations des taches avec les variations du magnétisme terrestre. — Au moment où la périodicité des taches s'im-

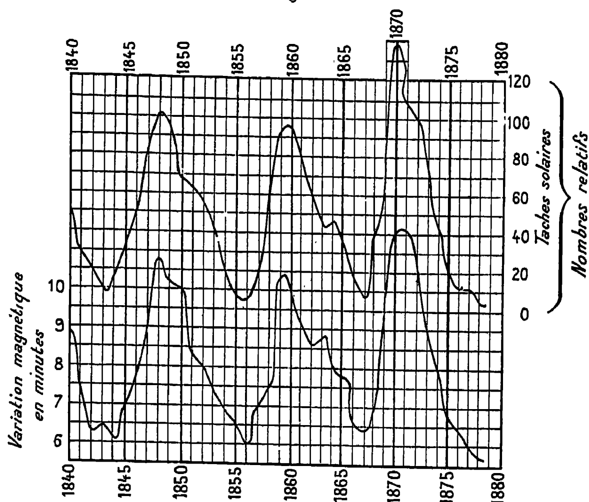
posait à tous, c'est-à-dire en 1851, Lamont, de Munich, annonce la périodicité d'un autre phénomène au premier abord tout différent, car il est seulement terrestre et concerne les variations de l'aiguille aimantée.

L'Union internationale pour l'étude du magnétisme terrestre, organisée en 1826 sous l'impulsion de Humboldt et de Gauss, avait déjà porté ses fruits, et sur les cinq continents s'étendait un réseau d'observatoires chargés de mesurer aussi continûment que possible les éléments magnétiques. L'aiguille aimantée, comme on sait, n'est jamais fixe; la force qui la maintient à peu près vers le Nord varie constamment en grandeur et en direction; elle a ses oscillations diurnes, annuelles, séculaires, heureusement très faibles. Or, Lamont constate que l'amplitude de l'oscillation diurne, relevée à Göttingue et Munich de 1835 à 1850, a nettement des variations périodiques avec une période voisine de 10 ans $\frac{2}{3}$.

L'année suivante, Sabine (1852), l'organisateur des stations magnétiques anglaises, reconnaît la même périodicité dans d'autres oscillations de l'aiguille, accidentelles, mais beaucoup plus fortes (allant jusqu'à plusieurs degrés), qui ont été appelées par Humboldt *orages magnétiques*. Elles surviennent brusquement sans cause apparente sur la Terre entière et durent plusieurs heures. Mais Sabine va plus loin, il compare le nombre des orages magnétiques au nombre des taches solaires et trouve qu'ils varient

simultanément dans le même sens ([1]); ils ont la même période vérifiée par toutes les obser-

Fig. 3.



Comparaison entre les variations des taches et les variations de l'oscillation diurne de l'aiguille aimantée.

vations ultérieures. De même aussi l'amplitude

([1]) Presque en même temps, cette relation était signalée aussi en France par Gautier et en Suisse par Wolff.

de l'oscillation diurne étudiée déjà par Lamont, et le nombre des aurores boréales, ont exactement aussi la loi de variation des taches. Wolff, de Zurich, a publié des courbes, reproduites ci-contre (*fig.* 3), qui résument les observations d'une longue série d'années. Le parallélisme des variations de la surface solaire et du magnétisme terrestre est frappant à première vue.

Accord moins net pour une tache isolée et une perturbation magnétique isolée. — La double découverte de Schwabe et de Sabine, d'une importance capitale, a excité une émotion légitime; elle dévoile un lien curieux, jusqu'alors insoupçonné, entre le Soleil et la Terre. L'action subie par nos aimants peut émaner directement du Soleil et de la tache, ou tenir à une même cause qui agit simultanément sur les deux astres [1]. Probablement la cause première réside dans la tache elle-même ou dans son entourage immédiat. Car le passage des très grosses taches près du centre du Soleil est accompagné le plus souvent de perturbations magnétiques terrestres qui, parfois même, sont tellement fortes que les communications télégraphiques sont arrêtées pendant plusieurs heures sur la Terre entière.

---

[1] La question a été discutée par Marchand et récemment par Sydgreaves, Cortie, Schuster et Maunder. Ce dernier a conclu que l'action exercée sur les aimants terrestres émane directement du Soleil.

Mais, d'une manière générale, la grandeur de la perturbation n'est pas proportionnelle à la grandeur de la tache; si une corrélation absolument étroite est certaine pour l'ensemble des deux phénomènes, elle est encore douteuse pour une tache isolée et une perturbation magnétique isolée. Le désaccord peut n'être qu'apparent, car la tache est simplement le phénomène solaire le plus frappant et le plus facile à reconnaître; son entourage et surtout l'atmosphère au-dessus d'elle, dont il sera question au dernier Chapitre, sont le siège d'autres phénomènes, non exactement proportionnels eux-mêmes à l'ombre de la tache, et auxquels l'action sur les aimants terrestres peut être imputée. Le problème sera résolu seulement par des recherches plus nombreuses et plus étendues.

La périodicité s'étend-elle aux autres éléments terrestres? — Cependant, de toutes les questions que soulève l'étude des taches, la plus importante assurément, la plus utile, est la variation présumée du rayonnement solaire, variation qui doit influer sur toutes les choses terrestres. Il convient de lui consacrer aussitôt quelques lignes, au moins très brèves, sans s'attacher à l'ordre chronologique ou aux limites du cadre de cette Note.

La variation simultanée des taches et des aimants terrestres est bien constatée; mais, comme nous ignorons le mécanisme spécial qui assure cet accord et le rôle probablement

non négligeable de l'atmosphère terrestre interposée, il est difficile de prévoir sa répercussion exacte sur les éléments météorologiques, pour nous les plus intéressants, tels que la température, la nébulosité, le régime des vents et des pluies en un lieu donné.

La question, cependant, a été soulevée bien avant la découverte de la périodicité et par le grand Herschell lui-même qui, en 1800, avait affirmé d'une manière saisissante l'influence du Soleil, en déclarant que le prix du pain était réglé par ses taches. L'examen précis des faits ne vérifie pas une dépendance aussi étroite; mais, très probablement, tous les éléments terrestres sont plus ou moins affectés dans le sens de la période undécennale.

Plusieurs auteurs ont annoncé, en effet, un accord avec les variations des taches pour la température moyenne en un lieu donné [1], le nombre des orages et la quantité de pluie. Mais les résultats présentés de divers côtés sont parfois contradictoires, probablement parce que les influences locales et les perturbations qui en résultent ne sont pas suffisamment éli-

---

[1] En France, Flammarion et Nordmann ont étudié les variations de la température moyenne. Ce dernier a confirmé, avec des documents plus complets, le résultat suivant de Koppen : dans les régions tropicales, la température moyenne varie un peu avec les taches et est plus petite au moment de leur maximum.

minées. Une conclusion nette et décisive sera fournie, semble-t-il, par des recherches étendues à de plus vastes régions de la Terre.

Variations du rayonnement solaire total. Résultats récents de Langley et Abbot. — *A priori*, il semble plus simple d'attaquer directement le problème, et de rechercher les variations du rayonnement solaire total. Mais la mesure de la quantité totale de chaleur envoyée par le Soleil aux limites de notre atmosphère est très difficile; abordée en 1838 par Pouillet, poursuivie depuis avec les appareils plus parfaits de Violle, Langley, Crova, K. Angström, elle n'est pas encore déterminée avec une précision suffisante. L'absorption par notre atmosphère, très complexe comme on le verra plus loin, et très variable elle-même, masque aisément les petits écarts que peut présenter le rayonnement solaire.

Langley, qui a consacré trente années de sa vie à la question, dans un Mémoire récent publié un peu avant sa mort, constate que la variation présumée du rayonnement total avec la période solaire n'est pas encore sûrement décelée par l'observation, mais il annonce d'autres résultats d'un intérêt peut-être encore plus grand. Les mesures du rayonnement total, faites dans une même année, dans son observatoire de Washington, et corrigées le mieux possible de l'absorption par notre atmosphère, ont parfois des différences qui atteignent la

dixième partie de leur valeur ; et Langley estime qu'elles sont dues à des variations de l'atmosphère solaire elle-même. Et, en effet, son collaborateur Abbot annonce peu après que l'augmentation du rayonnement correspond à une diminution du pouvoir absorbant de l'atmosphère solaire, mesuré directement, et à une augmentation de la température dans l'hémisphère nord de la Terre. Ces résultats sont présentés seulement comme probables, mais ils ont un tel intérêt que tous les astronomes physiciens s'en occupent à l'heure actuelle ; et, bientôt, grâce à la réunion des efforts, la question sera élucidée d'une manière complète. *A priori,* l'atmosphère solaire doit avoir, comme la nôtre, un pouvoir absorbant variable, et cette remarque fait ressortir la grande importance des recherches sur l'atmosphère solaire.

Découvertes récentes sur la répartition des taches et facules. — Depuis la découverte de la périodicité, le relevé des taches est fait avec le plus grand soin dans plusieurs établissements par l'observation oculaire [1] ou photographique. Il comprend à l'heure actuelle au moins sept périodes successives (si l'on remonte aux premières observations de Schwabe).

---

[1] En France, Guillaume, à l'Observatoire de Lyon, publie le relevé précis des taches fait avec l'œil.

Cette belle série de mesures précises a révélé des faits nouveaux fort intéressants sur la répartition des taches dans une même période et sur la succession des périodes.

Spörer (1880) a annoncé que les taches, d'un minimum au suivant, se rapprochent peu à peu de l'équateur, que, finalement, elles atteignent. De plus, deux ans avant le minimum, un second groupe distinct apparaît aux latitudes élevées (vers 30°), et le groupe précédent de l'équateur s'évanouit aussitôt que le minimum est dépassé.

Wolfer (1904) de son côté a étudié leur répartition en longitude. Les taches ont une tendance à se concentrer sur certains méridiens, et même parfois sur des méridiens opposés.

Enfin, Lockyer et Shuster (1900 à 1906) ont annoncé l'existence de périodes plus grandes et plus petites, superposées à la période undécennale [1]. Même Shuster a remarqué que toutes ces périodes sont reliées entre elles par une loi simple.

D'autre part, les facules, qui, à certains égards, offrent un intérêt plus grand que les taches, sont relevées en même temps et avec le même soin. D'une manière générale, elles

---

[1] Déjà, auparavant, Wolff, de Zurich, pour expliquer les variations de la période undécennale, avait admis comme très probable la superposition d'une période plus longue, comprise entre 50 et 60 ans.

suivent les variations des taches et sont liées à la période undécennale. Mascari, qui a étudié leur distribution en latitude, signale un maximum principal, qui se déplace avec les taches, et un maximum secondaire, près des pôles, qui disparaît au moment où les taches diminuent fortement.

CHAPITRE III.

ANALYSE SPECTRALE ET PHOTOGRAPHIE. APPLICATIONS A LA SURFACE ET AU RAYONNEMENT DE L'ASTRE.

Propriétés nouvelles de la lumière qui décèlent à distance la composition chimique des corps et leur mouvement radial. — La lumière est le messager envoyé par les astres qui nous annonce leur présence et leur état; elle est le lien de communication presque unique [1] avec ces objets éloignés. Aussi l'Astronomie a-t-elle profité largement de tous les progrès dans la connaissance de la lumière et des admirables découvertes de la physique moderne sur sa nature et ses propriétés.

La lumière émanée d'un corps nous révèle sa forme et sa couleur; or cette lumière a encore d'autres propriétés, récemment reconnues (en

---

(1) Il faut dire presque unique, parce que, probablement, la liaison avec les astres se fait par d'autres moyens. Ainsi l'action des taches sur l'aiguille aimantée terrestre est attribuée par certains à des jets de particules électrisées, repoussées par le Soleil avec une grande vitesse. Il faut ajouter que ces jets de particules, s'ils existent, doivent, vraisemblablement, être arrêtés par les couches supérieures de notre atmosphère et ne pas atteindre le sol. Leur action serait seulement indirecte.

1860); elle porte en elle-même la marque distinctive de la composition chimique du corps, de son état physique, et même de son mouvement par rapport à l'œil sur la ligne de visée. Mais, pour fournir tous ces résultats nouveaux, jusqu'alors jugés inaccessibles, elle doit subir *l'analyse spectrale,* être décomposée en ses radiations élémentaires par un prisme, un réseau, ou un appareil interférentiel, et être examinée ainsi dans ce qu'on appelle *son spectre.*

L'analyse spectrale révèle à distance la nature chimique des vapeurs incandescentes, et, parfois, plus aisément que l'analyse chimique ordinaire; elle est employée couramment à cet usage dans les laboratoires. De plus, elle décèle la vitesse radiale de la source lumineuse ou la vitesse d'éloignement et de rapprochement par rapport à l'observateur, lorsque cette valeur est assez grande et comparable à la vitesse de la lumière.

Ces méthodes nouvelles ont donné en Astronomie des résultats qualifiés justement de merveilleux. Le grand éloignement des astres apparaît d'abord comme un obstacle absolu à la reconnaissance d'éléments tels que la composition chimique et le mouvement radial. Le dernier élément, comme on sait, n'est pas fourni par les observations ordinaires avec la lunette seule, observations qui ne décèlent que les mouvements perpendiculaires au rayon visuel, et encore seulement lorsque l'astre est relativement rapproché. Or l'application des méthodes

nouvelles est indépendante de la distance; il suffit que la lumière soit assez intense pour supporter l'étalement par le prisme, et le nouveau domaine qui s'ouvre à l'activité des astronomes apparaît en quelque sorte illimité. L'analyse spectrale et l'invention des lunettes, complétée par la photographie, sont les assises fondamentales de l'astronomie physique.

Recherches sur la polarisation de la lumière. — La lumière est due à une variation périodique, à une sorte de vibration, qui, comme la vibration sonore, se propage par ondulations. La vitesse de propagation est énorme, à peu près 300 000^{km} par seconde, dans le vide et dans l'air; elle est notablement moindre dans les corps transparents liquides et solides. Mais la période de la vibration est excessivement courte, puisque la longueur d'onde (qui est le produit de la période exprimée en secondes, par la vitesse de la lumière) est encore très petite, $\frac{1}{2}$ millième de millimètre ou $0^{\mu},5$ pour la lumière verte dans l'air.

La vibration lumineuse est perpendiculaire au rayon, et, lorsque le corps qui l'émet est incandescent, comme le Soleil, cette vibration prend rapidement toutes les directions dans le plan normal au rayon. La lumière envoyée a les mêmes propriétés tout autour du rayon, elle se réfléchit également bien dans toutes les directions, elle est dite *naturelle* ou *ordinaire*. Mais, si cette lumière n'est pas une lumière

propre, si elle est réfléchie ou diffusée, comme cela est le cas avec la Lune et les planètes, elle perd le caractère précédent, elle se réfléchit mieux dans certaines directions particulières; elle est polarisée en totalité ou en partie. Inversement, l'étude de la polarisation fournit des indications utiles sur l'origine de la lumière émise par les corps; et le grand Arago, qui, vers 1810, a découvert dans le laboratoire plusieurs propriétés importantes des rayons polarisés, a étudié à ce point de vue toutes les lumières célestes.

La lumière de notre atmosphère est polarisée, de même aussi celle émise par la queue des comètes; la partie supérieure de l'atmosphère solaire, dont il sera question dans les Chapitres suivants, est également polarisée.

Recherches spectrales. Division en radiations simples. Raies noires du spectre solaire. — L'analyse spectrale fournit des renseignements et des résultats encore plus précieux. Elle est basée sur ce fait que la lumière, comme le son, est en général complexe et formée par la réunion de nombreuses radiations appelées *simples*, qui ont des périodes et des longueurs d'onde différentes. Ces radiations traversent le verre et les substances transparentes avec des vitesses différentes, et se séparent pour cette raison. La séparation est forte avec l'appareil spécial nommé *spectroscope*, qui comprend comme organes essentiels un prisme de verre (ou un

réseau) et une fente étroite par laquelle entre la lumière à analyser. Chaque radiation simple en sort avec une direction différente, et donne dans le champ de la lunette du spectroscope une image distincte de la fente, qui a reçu le nom de *raie;* le spectre est formé par l'ensemble de ces raies.

Newton, qui a fait de si belles études sur le spectre solaire, a reconnu le premier une propriété caractéristique de la radiation simple. Envoyée sur un autre prisme, dans un autre spectroscope, elle conserve sa couleur et n'est plus divisée et dispersée comme le rayon solaire primitif.

Newton a décrit la belle série de couleurs du spectre solaire qui s'étend du violet au rouge, le passage d'une couleur à la suivante ayant lieu par gradations insensibles. Mais il n'a pas observé les solutions de continuité, cependant très nombreuses, qui existent dans ce spectre, et sont les raies noires du spectre solaire, raies non absolument noires et seulement moins brillantes que le fond continu, réparties irrégulièrement et très variables de largeur et d'aspect.

Les raies noires ont été reconnues par Wollaston en 1802, et, douze ans plus tard, par l'opticien de Munich, Frauenhofer, qui, disposant d'appareils plus parfaits, a laissé un beau dessin du spectre solaire, et a désigné les raies noires principales par les lettres de l'alphabet, encore employées de nos jours; mais il n'a donné aucune explication du phénomène, qui est resté

pendant de longues années une énigme indéchiffrable.

Étendue du spectre solaire lumineux. Extension au delà du violet et surtout au delà du rouge. — Entre temps, Fresnel (1819) donnait des preuves décisives de la nature ondulatoire de la lumière, et mesurait les longueurs d'onde des principales couleurs. Il a trouvé pour le violet extrême environ $0^{\mu},4$ et $0^{\mu},8$ pour le rouge. La lumière comprend donc une octave entière et rien de plus; si l'on rappelle que le son forme plusieurs octaves, cette limitation imposée à la lumière paraît assez étrange; elle est due probablement à des causes physiologiques et n'est pas encore expliquée.

Le rayonnement solaire total, comme il est *a priori* naturel, est beaucoup plus étendu; il comprend d'autres rayons invisibles pour l'œil et signalés déjà avant Fresnel.

Les uns, au delà du violet, appelés *ultra-violets,* agissent sur la plaque photographique et sont étudiés aussi facilement que les rayons lumineux.

Les autres, au delà du rouge, exigent l'intervention assez compliquée d'une pile thermo-électrique ou d'un appareil similaire; ils représentent une part notable de l'énergie rayonnante du Soleil.

Cette extension du rayonnement, évidemment fort importante, sera examinée de nouveau plus loin. Dès à présent l'œil humain apparaît comme

un organe incomplet pour l'étude du rayonnement solaire total.

Fondation de l'analyse spectrale par Kirchhoff. — Dans la première moitié du dernier siècle, d'autres observateurs reprennent après Frauenhofer l'étude du spectre, et examinent dans le laboratoire les lumières terrestres ; ils trouvent soit un spectre absolument continu, soit des raies fines brillantes, c'est-à-dire tout autre chose que le spectre solaire, et aucune conclusion nette et définitive n'est formulée.

L'explication simple et la liaison de ces phénomènes ont été trouvées plus tard, en 1859, par le physicien Kirchhoff, qui a su déchiffrer le premier ce que Miss Clerke a appelé si justement les *hiéroglyphes du spectre solaire*. Aidé par le chimiste Bunsen, il organise un spectroscope simple et pratique pour les mesures, et, après avoir étudié le spectre des métaux dans les flammes, il formule les lois suivantes :

Les corps portés à l'incandescence ont un spectre continu s'ils sont liquides ou solides ; et, s'ils sont à l'état de gaz, ils ont un spectre discontinu, formé seulement de raies brillantes fines. Chaque corps simple a ses raies particulières qui occupent toujours la même position dans le spectre, et sont distinctes des raies émises par les autres corps. Le spectre du corps simple est donc un caractère distinctif, qui permet de le reconnaître entre tous.

Ils publient les spectres des métaux alcalins

destinés à l'analyse chimique des solutions, et, poursuivant leurs recherches dans cet ordre d'idées, ils rencontrent des raies nouvelles non rapportées encore à un corps connu. Aidés par cet indice qui les guide, ils découvrent deux corps simples nouveaux, le *rubidium* et le *cæsium*. L'analyse spectrale était fondée, et au premier essai montrait toute sa puissance.

Application au Soleil. Nature de sa surface. Composition chimique de ses vapeurs. — Kirchhoff s'attaque ensuite au spectre solaire et trouve un accord complet entre les raies brillantes de plusieurs métaux et certaines raies noires du spectre solaire.

Pour expliquer le renversement des raies, il présente l'expérience de la vapeur de sodium depuis devenue classique, et si facile à répéter dans le laboratoire. Une lampe d'alcool salé émet la raie jaune D, qui est brillante; placée sur le trajet d'un faisceau de lumière intense à spectre continu, elle apparaît encore dans ce dernier spectre, mais à l'état de raie noire.

D'où la loi générale énoncée en ces termes :

Une vapeur incandescente absorbe les radiations qu'elle émet et tend à substituer son intensité propre à celle de la lumière qui la traverse.

Le spectre spécial du Soleil est alors facile à expliquer. Le fond continu implique une surface solide ou liquide [1] incandescente, qui est ou une

---

[1] Un gaz illuminé à des pressions fortes et crois-

mer liquide ou une mer de nuages, formée de particules liquides ou solides, la seconde alternative étant de beaucoup la plus vraisemblable. Au-dessus de cette mer se trouvent des vapeurs incandescentes qui absorbent leur lumière particulière, et laissent ainsi dans le spectre par les raies noires la marque de leur présence.

Cette explication, si simple et si bien adaptée aux faits, fut acceptée aussitôt presque universellement. Quelques-uns cependant objectèrent que les vapeurs brillantes supposées devaient être visibles au delà du bord, et que, en réalité, on n'apercevait rien de semblable. Cette objection, comme on verra plus loin, a été levée plus tard.

Les découvertes de Kirchhoff apportent à la connaissance du Soleil une contribution exceptionnelle. Elles nous font connaître les conditions de la matière à sa surface et la nature chimique de cette matière; elles ont permis d'affirmer aussitôt dans le Soleil la présence de corps simples, très répandus sur la Terre, tels que le sodium, le calcium, le magnésium, le fer, etc. Le fer, en particulier, présente plus de deux mille coïncidences avec les raies noires du spectre.

Travaux ultérieurs sur le spectre solaire.

---

santes a des raies qui s'élargissent et finalement se transforment en un spectre continu. Mais le fond continu du spectre solaire ne peut être attribué à un gaz, parce que les raies noires ne sont pas élargies.

Conséquences générales. — Le travail de Kirchhoff a été repris et complété par d'autres physiciens, qui ont publié après lui des spectres solaires de plus en plus riches en détails, et ont noté avec une précision croissante les coïncidences des raies noires avec les raies brillantes des éléments terrestres.

Il faut citer après lui Angström, qui a publié le premier (en 1862) un spectre normal, c'est-à-dire exprimé en longueurs d'ondes, lequel a été complété en 1875 par Cornu pour la région ultraviolette et en 1880 par Abney pour la première partie du rayonnement infra-rouge (jusqu'à $1^{\mu},4$).

A l'heure actuelle, le travail le plus complet sur la matière est dû à Rowland, qui, après avoir réalisé une vis parfaite, a construit des réseaux de beaucoup supérieurs à ceux de ses devanciers. Il a obtenu par la voie photographique un spectre solaire lumineux et ultraviolet qui comprend plus de vingt mille raies noires, et dont les planches ont un développement de 20^{m}. Il a comparé aussi avec le même puissant appareil les spectres de presque tous les éléments connus au spectre du Soleil. Ses conclusions sont les suivantes :

Presque tous les corps de poids atomique léger (inférieur à 120), et les métaux en particulier se retrouvent dans le Soleil. Les métalloïdes, d'autre part, si l'on excepte l'hydrogène, le silicium et le carbone, ne montrent pas de coïncidences, sans que l'on puisse d'ailleurs

affirmer leur absence ; ils offrent en effet, la plupart, la propriété de donner difficilement leurs raies caractéristiques, lorsqu'ils sont mêlés aux métaux. De toute façon, les corps légers retrouvés dans le Soleil sont, d'une manière générale, ceux qui composent l'écorce terrestre, les proportions d'un corps à l'autre étant aussi à peu près les mêmes; car, le plus souvent, les raies noires fortes correspondent aux corps simples terrestres les plus importants. Aussi Rowland a pu écrire que la Terre échauffée à la température du Soleil donnerait le même spectre.

Tous ces faits sont favorables à l'hypothèse si bien développée par Laplace qui ramène les planètes et le Soleil à la condensation progressive d'une même nébuleuse.

D'ailleurs, les étoiles dites *jaunes*, qui forment à peu près le tiers des étoiles du ciel, ont le même spectre que le Soleil, et donc aussi la même composition que la Terre, au moins à la surface. Les autres étoiles, qui ont des spectres différents, offrent aussi de nombreuses coïncidences avec les éléments terrestres, et il a été possible de proclamer l'unité de la matière dans tout l'univers.

D'autre part, il faut méditer la remarque suivante : Sur les vingt mille raies du spectre de Rowland, un tiers seulement a pu être identifié avec les éléments terrestres connus, et les astres autres que les étoiles jaunes ont aussi un nombre important de raies dont l'origine est

encore indéterminée. On peut en inférer que la nature offre de nombreux corps simples, que nous n'avons pas encore reconnus, et qui probablement existent sur la Terre en quantité plus ou moins grande. Une autre explication est cependant possible : la matière, dans le Soleil, les étoiles et les nébuleuses, est soumise à des conditions qui sont différentes de celles de la Terre et même différentes d'un astre à un autre; elle peut avoir, dans ces cas très divers, des vibrations différentes ou encore se dissocier en éléments plus simples, suivant l'hypothèse soutenue brillamment par Lockyer. Toutes ces questions que soulève l'analyse spectrale touchent aux plus hauts sommets de la philosophie naturelle ; elles sont posées simplement et non résolues.

Raies et bandes telluriques. Absorption complexe du rayonnement solaire par notre atmosphère. — Cependant les raies noires du spectre ne sont pas toutes d'origine solaire; quelques-unes, appelées *raies telluriques*, sont dues à l'absorption exercée par l'atmosphère terrestre. Ces dernières se distinguent par l'élargissement plus grand qu'elles subissent, lorsque, le Soleil s'abaissant, l'épaisseur d'air traversée par les rayons est constamment croissante.

Elles ont été signalées par Brewster et leur origine terrestre a été démontrée nettement par Janssen à l'aide d'expériences directes sur les lumières terrestres. Les raies dues à l'oxygène

et à la vapeur d'eau ont été reconnues dans le spectre lumineux, et Egoroff a montré que 80^m d'oxygène, à la pression atmosphérique, produisent déjà une absorption appréciable dans le rouge extrême. Les raies de la vapeur d'eau varient avec l'état hygrométrique de l'air, et fournissent des indications précieuses sur la quantité totale de vapeur contenue dans l'atmosphère.

Mais l'atmosphère terrestre n'intervient pas seulement pour les petites raies et bandes telluriques, elle intervient surtout par l'absorption générale, beaucoup plus importante, qu'elle exerce sur l'ensemble du spectre lumineux et du spectre total. Cette absorption tient aux gaz et aussi aux petites particules en suspension qui diffusent et dispersent la lumière solaire et constituent ce que l'on a appelé justement la *vase atmosphérique*. C'est ainsi que le Soleil, à l'horizon, subit un changement de couleur et une forte diminution d'éclat.

Dans la partie ultraviolette, l'atmosphère limite à une demi-octave le spectre solaire, alors que les sources terrestres s'étendent à une octave entière, et à deux octaves si l'on opère dans le vide. Même limitation aussi dans l'infrarouge, qui offre en plus de très larges bandes d'absorption, qui sont de véritables brèches, et sont rapportées en partie à la vapeur d'eau et à l'acide carbonique. La proportion de la chaleur solaire arrêtée par notre atmosphère, lorsque l'épaisseur traversée est la plus faible, c'est-

à-dire lorsque le Soleil est au zénith, a été estimée par Rosetti, en 1879, à 29 pour 100, en 1890, par K. Angström à 64 pour 100, par Langley successivement à 41 pour 100, 30 pour 100 et tout récemment à 20 pour 100.

Les écarts des nombres précédents font ressortir la difficulté de mesurer exactement le pouvoir absorbant total de l'atmosphère, variable d'ailleurs avec les lieux, les jours, les saisons et les années, et, par suite, de mesurer la constante solaire (1) qui est, comme on sait, la quantité d'énergie envoyée par le Soleil aux limites de notre atmosphère.

Depuis la découverte de la périodicité des taches, cette constante est supposée, en réalité, quelque peu variable; mais on comprend que la vérification de cette idée (*voir* p. 29), n'ait pas encore été possible. La question est, en effet, très complexe et présente des faces multiples; elle est exposée magistralement dans un Mémoire récent de Violle, auquel je renvoie le lecteur désireux de connaître son état actuel (2).

---

(1) La constante solaire est exprimée par le nombre de petites calories que le rayonnement solaire, aux limites de notre atmosphère, apporte en 1 minute à l'unité de surface (1 centimètre carré). Elle est comprise entre 3 et 4 calories. Le nom de constante solaire a été adopté avant la découverte de Schwabe, et a été conservé depuis.

(2) Le Mémoire de Violle a été présenté au Congrès de Météorologie qui s'est tenu à Innsbrück, en 1905.

La complexité tient surtout à ce que les différentes parties du rayonnement solaire, séparées dans le spectre, subissent des absorptions très différentes; aussi Langley a conclu à la nécessité de les étudier séparément. Elles ont aussi des propriétés différentes: la partie infra-rouge échauffe seulement, semble-t-il, et est modifiée surtout par la quantité variable de vapeur d'eau traversée. D'autre part, la partie ultra-violette, qui représente une quantité d'énergie beaucoup plus faible, est affectée principalement par les particules; dans sa portion la plus réfrangible, elle est absorbée fortement par une mince couche d'air et n'arrive pas jusqu'à la Terre; elle doit intervenir dans tous les phénomènes de la haute atmosphère et, en particulier, dans les phénomènes électriques.

En résumé, on aura la plus grande peine à reconnaître exactement l'absorption imposée par notre atmosphère au rayonnement solaire et aussi l'influence de cette absorption sur l'atmosphère et la Météorologie terrestre. Le double problème est à la fois très beau et très difficile.

Variations du spectre solaire. Variations dues à la composition chimique. — Les recherches précédentes sur le spectre solaire ont été faites surtout par les physiciens. Les astronomes, de leur côté, l'ont étudié aux différents points de la surface, et n'ont pas trouvé, en général, de grandes différences, sauf dans l'ombre et la

pénombre des taches. Là, les raies solaires sont souvent ou manquantes, ou modifiées dans leur aspect, ou même renversées. Parfois aussi, des raies et bandes nouvelles apparaissent.

Lockyer a annoncé que les modifications des raies dans les taches sont liées à la période solaire; aussi le spectre des taches est-il l'objet d'une étude systématique avec l'œil ou la plaque photographique dans plusieurs observatoires.

Variations dues au mouvement radial. Mesures de la vitesse de rotation. — Les spectres des différents points de la surface offrent une variation d'un autre ordre et d'un intérêt au moins égal, qui correspond à la seconde propriété fondamentale de l'analyse spectrale, à la propriété de déceler les mouvements de rapprochement et d'éloignement par rapport à la Terre. Cette propriété, annoncée par Doppler et Fizeau, est générale et s'applique à tous les mouvements vibratoires qui se propagent par ondulations. Avec le son par exemple, si l'observateur se rapproche du corps sonore ou le corps sonore de l'observateur, le nombre de vibrations qui arrivent à l'oreille en une seconde, est augmenté; il est diminué dans le cas contraire. De même, pour la lumière des gaz incandescents, la raie fine caractéristique du gaz est déplacée vers le rouge ou vers le violet selon que la vitesse relative par rapport à l'observateur est une vitesse d'éloignement ou de rap-

prochement, et le déplacement est proportionnel à la vitesse relative [1].

Les applications de ce principe au Soleil et aux étoiles sont extrêmement étendues. Le Soleil a un mouvement général de rotation et des perturbations locales; or, le spectre les enregistre fidèlement, ou tout au moins enregistre les composantes de la vitesse dans la direction Terre-Soleil. Cette direction privilégiée est peut-être d'ailleurs la plus intéressante, si l'on considère l'importance accordée par certaines théories à des jets de particules électrisées supposées chassées du Soleil vers la Terre avec une grande vitesse.

Dans le Soleil, tous les points de l'hémisphère Est se rapprochent et ont un déplacement vers

---

[1] D'autres causes qui ont, il est vrai, un effet bien moindre, peuvent aussi déplacer la raie gazeuse. D'après Humphreys et Mohler, la pression du gaz produit un déplacement qui lui est proportionnel, toujours dirigé vers le rouge, variable avec la raie et le gaz, mais très petit, et toujours inférieur (pour une pression de 12 atmosphères) au déplacement qui correspond à une vitesse radiale de 4^{km} par seconde.

Récemment, Julius a fait ressortir un effet spécial, dû à la dispersion anomale, qui est très nette dans le voisinage de certaines raies, telles que la raie jaune du sodium. Lorsque la vapeur correspondante, ainsi que dans le Soleil, est en contact avec une surface qui émet un spectre continu intense, la dispersion anomale peut donner lieu à des raies brillantes non négligeables, qui sont en apparence déplacées.

le violet; ceux de l'hémisphère Ouest sont déplacés vers le rouge. Les points qui ont le plus grand déplacement sont les bords équatoriaux (vitesse $\pm 2^{km}$ par seconde), et si on les juxtapose le déplacement est doublé. Cette juxtaposition des spectres des deux bords a été réalisée souvent aux débuts de l'analyse spectrale, et pour vérifier le principe de Doppler-Fizeau. L'observation était difficile à cause de l'imperfection des appareils; elle est maintenant facile et précise avec les grands réseaux de Rowland; même, cette disposition a été adoptée en 1891 par Duner pour vérifier spécialement la loi de Carrington (*voir* p. 21) sur la rotation des taches, et la croissance de la durée de rotation avec la latitude. La conclusion a pu être étendue à la surface même du Soleil ([1]) dans la région des taches, et aux latitudes supérieures à 45°, qui ne sont jamais visitées par les taches. A 15° du

([1]) La conclusion, en réalité, ne s'applique pas à la surface même, mais à la vapeur productrice de la raie noire déplacée, qui, dans l'expérience de Duner, était une raie du fer. Cette vapeur de fer repose directement sur la surface; mais elle ne tourne pas exactement comme les taches, car la durée de rotation à l'Équateur est $25^j,5$ pour la vapeur et 25^j pour la tache, et cette différence d'un demi-jour se maintient à toutes les latitudes visitées par les taches.

La rotation du Soleil a été aussi recherchée avec la même méthode par Jewell, Crew et Halm. Ce dernier a conclu à une variation probable de la vitesse de rotation avec la période solaire.

pôle, Duner a trouvé, pour la surface du Soleil, une durée de rotation de 38,5 jours; alors que, à l'équateur, elle est seulement de 25,5 jours.

Les raies noires du spectre ont parfois, surtout autour des taches, des déplacements beaucoup plus forts, qui annoncent une perturbation locale et exceptionnelle de la matière. Ces phénomènes, assez rares d'ailleurs et d'autant plus intéressants pour cette raison, ont été signalés en 1870 par Lockyer. Leur étude est faite, en général, avec l'appareil de grande dispersion qui est organisé pour l'étude du spectre même des taches et de ses variations.

Importance croissante de la photographie. Applications multiples au Soleil. — Les recherches précédentes sur la surface du Soleil, commencées en 1610 avec l'invention des lunettes, ont été poursuivies en grande partie avec l'œil seul; car, c'est seulement vers l'année 1860 que la plaque photographique intervient à son tour, ayant été rendue suffisamment pratique pour un usage courant. Depuis, elle a reçu des perfectionnements notables et est employée de plus en plus ; même, elle se substitue peu à peu à l'œil dans toutes les observations astronomiques. Pour le Soleil, en particulier, elle est nécessaire; l'étude complète du Soleil, on peut l'affirmer, n'est possible qu'avec la plaque photographique.

L'invention de la photographie complète heureusement l'invention des lunettes ; elle apporte

à la lunette la rétine qui lui manque, et lui permet de se suffire à elle-même. L'assimilation de la lunette à un œil agrandi, présentée dans un paragraphe précédent, n'est vraiment exacte que lorsque la lunette est photographique.

Les avantages de la plaque sensible par rapport à l'œil sont bien connus, et ont été exposés plusieurs fois dans cet *Annuaire*. La plaque voit lorsque l'œil est aveugle; elle accumule les impressions en quelque sorte indéfiniment, et conserve une image fidèle de l'objet. Elle a un autre avantage sur lequel on insiste moins en général, et qui, pour le Soleil, est capital. Elle est aussi grande qu'on le veut et enregistre aussi facilement une grande image qu'une petite.

L'œil, au contraire, a une faible capacité, et, placé à l'oculaire d'un grand instrument dirigé vers la Lune ou le Soleil, il n'aperçoit qu'une petite portion de l'image, et demande un temps très long pour l'examen successif de toutes les parties. La plaque, d'autre part, saisit au même moment, le plus souvent très court, l'image entière. MM. Lœwy et Puiseux, dans leur beau travail sur la photographie de la Lune (voir *Annuaire* de 1898, p. A. 8), remarquent qu'une pose d'une seconde, faite sur la Lune dans de bonnes conditions, donne plus de détails précis qu'un observateur habile et patient ne peut en dessiner pendant plusieurs années. L'avantage est encore plus grand avec le Soleil; sa surface n'est pas solide comme celle de la Lune et tou-

jours semblable à elle-même; elle varie incessamment, surtout auprès des taches, et l'œil est absolument incapable de suivre ces changements parfois très rapides. La plaque seule permet l'étude continue de la surface entière, et la même conclusion s'impose plus fortement encore dans l'étude de l'atmosphère solaire, qui a des variations encore plus rapides.

La première photographie du Soleil a été faite en 1845 par Fizeau et Foucault sur une plaque daguerrienne; cette épreuve, qui a été conservée, offre des détails intéressants; mais les auteurs, qui étaient plutôt des physiciens, n'ont pas poursuivi ces premiers essais. En 1857, de La Rue organise à Kew, en Angleterre, un appareil permanent, appelé *photohéliographe,* pour la photographie journalière du Soleil et le relevé précis des taches. Son œuvre a été reprise en 1872 et continuée par l'observatoire de Greenwich, qui s'est adjoint les deux observatoires de l'île Maurice et de Dehra Dûn, armés des mêmes instruments que lui, pour diminuer le plus possible les jours privés de l'enregistrement photographique du Soleil.

D'autres observatoires ont aussi poursuivi la photographie régulière du Soleil; mais, sans contredit, les plus belles épreuves, les plus riches en détails ont été obtenues par Janssen à Meudon, grâce à un choix judicieux des surfaces optiques et de la plaque sensible. La série, commencée en 1875, a été poursuivie depuis sans interruption. Les images de Meudon montrent

nettement la granulation de la surface solaire; le plus souvent aussi, la netteté et aussi la forme des grains solaires varient d'une partie à l'autre de l'image, et la surface se divise à première vue en plages d'aspect différent. Ce curieux phénomène, appelé *réseau photosphérique,* est dû très probablement à des variations spéciales de l'atmosphère terrestre; de nouvelles recherches seront nécessaires pour déterminer sûrement son origine.

La plaque photographique est aussi utilisée de plus en plus dans l'étude spectrale du Soleil. Les premières plaques étaient impressionnées seulement par les rayons du bleu à l'ultra-violet; actuellement le commerce en fournit qui conviennent au spectre lumineux tout entier, et Abney en a fabriqué de spéciales pour les rayons infra-rouges les plus voisins du rouge (de $0^{\mu},8$ à $1^{\mu},4$).

Toutes ces plaques sont perfectionnées peu à peu et rendues plus sensibles et de nouveaux progrès sont encore à espérer; car, à tout prendre, la plaque, au moins pour les courtes poses, inférieures à $\frac{1}{10}$ de seconde, est encore surpassée par l'œil humain. Les étoiles filantes, si facilement perçues par l'œil, ne sont pas saisies ou sont saisies très rarement par les chambres photographiques, même munies d'un large objectif, à grande concentration de lumière; le grain de la rétine est aussi, en général, plus petit que celui de la plaque. Mais l'activité des chercheurs, dans le domaine photographique, est

telle que la plaque semble appelée à suivre une marche toujours ascendante.

En résumé, la photographie, présentée par certains comme un auxiliaire, est, tout au moins, un auxiliaire infiniment précieux. Elle complète l'œil humain imparfait sur beaucoup de points et augmente dans de larges proportions la puissance d'investigation de l'homme. Ses applications s'étendent non seulement à l'Astronomie, mais à toutes les sciences et à tous les actes de la vie courante.

CHAPITRE IV.

RÉVÉLATION PAR LES ÉCLIPSES DE L'ATMOSPHÈRE ET DE SES TROIS COUCHES PRINCIPALES AU BORD SOLAIRE EXTÉRIEUR.

Indices de l'existence d'une atmosphère autour du Soleil. — Le Soleil, observé à l'œil nu ou avec une lunette, même puissante, offre un bord rond, qui se détache bien sur le fond lumineux de notre ciel. La lumière de ce fond, qui diminue progressivement lorsqu'on s'éloigne du Soleil, présente tout autour du bord le même éclat, sans montrer aucun détail perceptible. L'examen des alentours du Soleil, fait dans les conditions ordinaires, ne révèle donc aucune dépendance extérieure; et l'astre est comparable à un énorme globe de fer qui serait chauffé à blanc.

Cependant, certains indices font présumer l'existence d'une atmosphère analogue à celle de la Terre ou de la planète Vénus. La surface du Soleil n'est pas également brillante en tous ses points : son éclat diminue rapidement du centre vers les bords, et la couleur aussi change: plutôt bleuâtre (1) au milieu, elle devient légèrement rouge au bord. Ces différences s'expli-

(1) La couleur bleuâtre du centre du Soleil est surtout notable à une grande altitude.

quent aisément par une atmosphère qui, comme la nôtre, absorbe et modifie plus fortement la lumière qui la traverse sous une épaisseur plus grande. C'est ainsi que le Soleil, lorsqu'il s'approche de l'horizon, s'affaiblit de plus en plus et devient nettement rouge, aussi bien au centre qu'au bord. L'atmosphère présumée du Soleil et l'atmosphère terrestre produisent les mêmes variations de couleur et d'intensité.

Le rapport entre les éclats du bord et du centre est variable avec les couleurs, et diminue régulièrement du rouge au violet; ce qui explique la couleur rougeâtre, signalée plus haut, du bord solaire observé au zénith. Ce rapport, qui représente la variation des éclats sur la surface, et qui est lié au pouvoir absorbant de l'atmosphère solaire, est fort important. Des recherches toutes récentes laissent entrevoir que le rapport, mesuré pour l'ensemble des radiations, n'est pas constant (*voir* p. 30); il serait soumis parfois à des écarts notables.

Les premières études spectrales apportèrent aussi de fortes présomptions en faveur d'une atmosphère; car l'explication des raies noires du spectre par Kirchhoff impliquait de nombreuses vapeurs métalliques répandues autour de la surface. Kirchhoff estimait même que ces vapeurs devaient s'étendre à une grande distance, et Angström, en 1860, émettait une opinion analogue, après avoir comparé les spectres du centre et des bords, et constaté seulement de faibles différences. Ces premiers observateurs

n'ont pas reconnu de raies brillantes au bord extérieur, et cette preuve directe de l'existence d'une atmosphère n'a été donnée que plus tard.

Révélation par les éclipses totales. Deux parties principales : chromosphère avec les protubérances et couronne. — En réalité, l'atmosphère solaire a été révélée par les éclipses totales, qui offrent pour sa reconnaissance et son étude des avantages exceptionnels. Cette atmosphère, très étendue, est lumineuse par elle-même, mais faiblement lumineuse et, en temps ordinaire, elle est masquée par l'illumination beaucoup plus vive de notre ciel, éclairé par les rayons solaires. Si la Lune s'interpose et recouvre complètement le Soleil (1), le ciel s'obscurcit et l'atmosphère apparaît dans toute sa splendeur et dans toute son étendue.

Le phénomène est un magnifique spectacle, un des plus beaux que l'on puisse voir. Il suffira de rappeler ses traits caractéristiques.

La Lune, dans son mouvement progressif, a réduit le Soleil à un mince croissant lumineux, et le Ciel est déjà presque noir ; puis les cornes

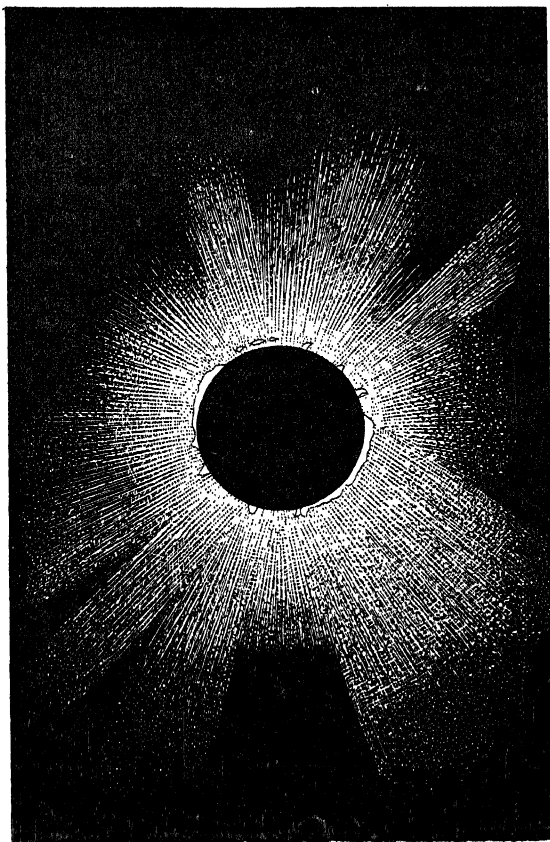
---

(1) Le diamètre apparent (ou diamètre angulaire vu de la Terre) varie pour le Soleil de 32′36″,4 à 31′31″,9 et pour la Lune de 33′37″,6 à 29′21″. L'éclipse est totale lorsque le diamètre apparent de la Lune est supérieur à celui du Soleil ; et la durée de la totalité, toutes choses égales d'ailleurs, augmente avec la différence des deux diamètres.

ou pointes du croissant se rapprochent avec une rapidité croissante et disparaissent. Aussitôt changement à vue : le disque noir et rond de la Lune apparaît nettement limité, au milieu d'un anneau lumineux très large. Le contraste est frappant ; car la Lune noire occupe la place du Soleil et l'anneau lumineux une région du ciel qui auparavant paraissait noire. L'anneau, de couleur blanche, est dégradé vers l'extérieur. Ses points saillants sont : d'une part, les parties les plus brillantes situées à l'intérieur, qui sont un mince croissant d'un rouge vif à la place du croissant solaire évanoui un instant auparavant et des proéminences ou protubérances également rouges tout au tour du bord lunaire ; d'autre part, la largeur de l'anneau et les rayons, parfois très longs, qui s'en détachent vers l'extérieur. L'apparition dure quelques instants seulement ; car, du côté opposé à celui qui a vu disparaître le dernier rayon solaire, apparaissent d'abord un mince croissant rouge, puis subitement un point brillant qui aveugle et s'élargit rapidement en un mince croissant très brillant. C'est le Soleil qui revient de l'autre côté, et l'anneau lumineux s'évanouit rapidement.

Cet anneau et ses deux couches superposées, la partie basse, rouge, complétée par les proéminences, appelée *chromosphère* et la partie haute, appelée *couronne*, sont des dépendances réelles du Soleil, on le sait maintenant d'une manière certaine ; mais la certitude n'a été acquise qu'au

Fig. 4.



Anneau lumineux de l'éclipse de 1860, d'après Secchi.

prix de longs efforts et après de vives discussions.

La figure 4 ci-contre représente l'anneau de l'éclipse de 1860. Les flammes blanches, de forme irrégulière, qui apparaissent au bord lunaire sont la chromosphère et les protubérances qui, en réalité, sont rouges; les croissants minces, d'un rouge vif, du commencement et de la fin, sont représentés très élargis; et leur éclat est beaucoup plus grand que celui de la couronne, plus grand que le dessin ne l'indique.

Courte durée et rareté des éclipses. Difficultés de leur observation. — L'éclipse totale du Soleil est en effet très courte: sa durée, sous nos latitudes étant comprise entre 0 seconde et 6 minutes; de plus, elle est très rare pour un lieu donné de la Terre. Le nombre des éclipses totales est seulement de dix en 18 ans [1], et chacune, comme on sait (*voir* la Note de l'année précédente), n'est visible que sur une bande étroite de la Terre, qui varie d'une éclipse à l'autre. On a calculé qu'un même lieu de la Terre est visité par une éclipse totale seulement tous les 360 ans en moyenne.

Pour observer l'anneau lumineux de l'éclipse, il faut pouvoir déterminer à l'avance les points précis de la Terre où elle est totale, c'est-à-dire

---

[1] Cet intervalle de 18 ans, ou exactement de 18 ans 11 jours $\frac{1}{3}$, est la période découverte il y a six mille ans par les Chaldéens, et appelée *Saros*.

la ligne ou bande de totalité, et faire au besoin un long voyage. Or, la trace exacte du cône d'ombre de la Lune sur la Terre est difficile à bien connaître; elle est déterminée avec précision seulement depuis un siècle (*voir* Chap. I, p. 11). Ce sont les progrès réalisés d'une part par l'Astronomie de position et la Mécanique céleste, d'autre part par la Géodésie et la Géographie, qui ont assuré la prédiction et l'observation des éclipses totales. L'Astronomie, écrit Laplace à la première page de son *Exposition du système du Monde,* est, de toutes les sciences naturelles, celle qui offre le plus long enchaînement de découvertes; cette remarque s'applique exactement à la question de l'atmosphère solaire.

Éclipses de 1842, 1851, 1860. *Résultats.* — Cependant une éclipse totale, facile à observer, fut annoncée pour l'année 1842; la ligne de totalité traversait l'Espagne, la France et l'Italie. Les principaux astronomes s'établirent avec leurs instruments sur les points les plus favorables, et Arago, qui avait observé le phénomène à Perpignan, a résumé tous les résultats obtenus, dans une Note de cet *Annuaire* (1846). Les observateurs notèrent les deux parties principales de l'anneau lumineux, c'est-à-dire la chromosphère ([1]) avec les protubérances rouges et

([1]) Le nom de *chromosphère,* qui désigne la couche du croissant mince rouge, a été adopté plus tard; mais

la couronne ; quelques-uns même présentèrent les protubérances comme un phénomène nouveau ; les éclipses totales étaient si rares et occupaient si peu l'attention que leurs descriptions antérieures avaient passé inaperçues. Aussitôt après, commença une vive discussion sur l'origine de l'anneau lui-même. L'opinion générale fut que les protubérances étaient liées au Soleil, mais des astronomes autorisés les rapportèrent à la Lune ou à une illusion d'optique.

Cette discussion eut tout au moins l'avantage de faire ressortir l'importance probable du phénomène ; et toutes les éclipses suivantes furent observées avec le plus grand soin, en particulier celles de 1851 et de 1860.

En 1860, la photographie fut employée pour la première fois. Les épreuves successives de l'anneau lumineux montrèrent que les protubérances sont couvertes ou découvertes progressivement, avec le mouvement de la Lune ; et leur origine solaire fut démontrée. Secchi a résumé ainsi les résultats de cette éclipse :

1° Les protubérances ne sont pas des illusions d'optique, mais sont un phénomène réel du Soleil.

2° Elles sont des masses de matière lumineuse dont le rayonnement est très actif sur les plaques photographiques.

3° Quelques protubérances flottent au-dessus

---

il est employé pour éviter la confusion. L'astronome anglais Airy lui avait d'abord donné le nom de *sierra*.

de la surface comme les nuages dans notre atmosphère. Elles ont des formes différentes; mais leurs changements sont insensibles dans l'espace de 10 minutes.

4° En plus des protubérances, si nettement visibles, il y a une couche, formée de la même matière lumineuse, qui entoure le Soleil entier et de laquelle se détachent les protubérances.

5° Le nombre des protubérances est extrêmement grand; et, avec une lunette, le Soleil apparaît entouré de flammes trop nombreuses pour être comptées (1).

Si l'on excepte une erreur de détail sur les changements des protubérances, qui, en réalité, varient parfois beaucoup en 10 minutes, les conclusions précédentes ont été vérifiées ensuite de toutes les manières. Mais la nature même de la chromosphère et des protubérances restait indéterminée.

Éclipse de 1868. *Première application de l'analyse spectrale.* — Cette lacune a été comblée bientôt par l'analyse spectrale qui venait

---

(1) Le croissant rouge mince de la chromosphère, du côté de l'extérieur, offre un bord formé de nombreuses petites dents lumineuses. Ces dents sont aussi des protubérances, mais beaucoup plus petites que les grandes protubérances, dont la hauteur, parfois, dépasse de beaucoup l'épaisseur moyenne de la chromosphère. C'est à ces petites protubérances que se rapporte la cinquième proposition de Secchi.

de naître, et qui, appliquée au Soleil par Kirchhoff (1860), aux étoiles par Huggins et Secchi (1862), aux nébuleuses par Huggins (1864), avait dévoilé leur composition chimique. En 1868 eut lieu une grande éclipse totale, longue de 6 minutes, et visible aux Indes où le ciel est très pur. Plusieurs observateurs, les anglais Tennant et Herschell, l'américain Pogson, les français Janssen et Rayet, dirigèrent un spectroscope sur les protubérances. Tous trouvèrent un spectre continu, sur lequel se détachent des raies fines extrêmement brillantes, qui, la plupart, coïncident avec les raies de l'hydrogène. Les protubérances sont donc d'énormes masses de gaz dont l'hydrogène est le constituant principal.

Cette éclipse est mémorable par les résultats qu'elle a fournis; quelques semaines après, d'ailleurs, Janssen et Lockyer annoncent que le même spectroscope, employé si utilement pendant l'éclipse pour reconnaître la nature des protubérances, décèle aisément leur présence au bord solaire en temps ordinaire, en dehors des éclipses. Cette découverte, d'une importance évidente, sera analysée avec détails dans le Chapitre suivant.

Éclipses de 1869 *et* 1871. *Révélation d'une troisième couche plus basse, dite couche renversante.* — Dans l'éclipse de 1868, les astronomes s'étaient occupés seulement des protubérances, qui, en raison de leur éclat, attirent tout

d'abord l'attention; dans l'éclipse suivante de 1869, visible en Amérique, Young et Harkness analysent au spectroscope la lumière de la couronne, et trouvent un spectre absolument continu avec une seule raie brillante verte [1], qui, depuis, a été reconnue comme nouvelle et rapportée à un gaz hypothétique très léger, nommé le *coronium*.

La lumière de la couronne, comme celle des protubérances, est donc différente de celle du Soleil; elle est une lumière propre émise directement par la matière de l'anneau, et ce dernier fait est une preuve nouvelle et décisive de son origine solaire. La nature du spectre indique que les protubérances sont surtout formées par des gaz, et que la couronne est constituée principalement par des particules liquides ou solides. Ces dernières particules, cependant, doivent diffuser les rayons intenses de l'astre; et, en en effet, dans l'éclipse de 1871, Janssen a reconnu quelques raies noires solaires dans le spectre coronal, mais seulement aux limites extérieures de la couronne [2].

---

[1] Dans les éclipses suivantes, d'autres raies fines, mais moins brillantes, ont été reconnues dans le spectre de la couronne. Toutes ces raies n'ont pu être rapportées à un élément chimique connu.

[2] Les raies noires solaires du spectre coronal ont été enregistrées avec la plaque photographique en 1893 par de la Baume Pluvinel.

Ces premières observations spectrales ont donné les résultats les plus intéressants sur les nouvelles dépendances solaires; mais, sur un point particulier, elles ont apporté une déception. Les astronomes s'attendaient à trouver dans l'anneau des éclipses toutes les vapeurs des raies noires du spectre solaire, et Kirchhoff, comme on l'a remarqué plus haut (*voir* pages 42 et 58), estimait que ces vapeurs s'élevaient jusqu'à la couronne. Or, le spectroscope annonçait un seul gaz connu et très léger, l'hydrogène. Peut-être les autres vapeurs, plus lourdes, s'élèvent-elles à une hauteur beaucoup plus faible, au point de se détacher à peine au bord extérieur? Cette explication, *a priori* probable, est aussi la vraie; les vapeurs lourdes forment à la base de la chromosphère une couche qui, à la distance du Soleil, apparaît très mince. Cette couche a été observée pour la première fois par Young pendant l'éclipse de 1871. Il avait placé la fente fine de son spectroscope sur le point du second contact au bord lunaire; et, immédiatement après la disparition des raies noires ordinaires, il a vu le champ entier de sa lunette rempli de raies brillantes et très nombreuses, au point, dit-il, qu'on ne peut les compter. Les raies sont visibles seulement pendant 1 ou 2 secondes, d'où le nom de *spectre éclair* qui leur a été donné.

Les vapeurs brillantes annoncées par Kirchhoff étaient donc reconnues, au moins dans leur ensemble.

La couche ainsi décolée par son spectre a été appelée *couche renversante;* elle est très mince, puisqu'elle est recouverte très rapidement par la Lune.

Comparaison avec l'atmosphère terrestre. Sens restreint donné au mot chromosphère. — Les trois éclipses de 1868, 1869 et 1871 forment un groupe remarquable, qui a révélé dans ses traits généraux la nature des trois couches principales de l'anneau. L'usage a prévalu de donner à l'ensemble de l'anneau le nom d'*atmosphère solaire,* quoique les deux couches basses, la couche renversante et la chromosphère, formées de vapeurs, soient les seules que l'on puisse comparer à notre atmosphère (de ατμος, vapeur). La couche haute, de beaucoup la plus épaisse, qui est la couronne, a une structure différente, étant formée par des particules qui doivent être très espacées; elle constitue un phénomène nouveau qui n'a pas son correspondant sur la Terre, au moins dans l'état actuel de nos connaissances. Les rayons normaux qui s'en détachent ont été rapprochés justement des queues cométaires et sont explicables par les mêmes théories. Or, depuis longtemps, on avait admis pour les deux phénomènes une force répulsive émanée du Soleil; mais la nature de cette force restait inconnue. Récemment, la lacune a été comblée par la pression de radiation (p. 12), qui a été reconnue expérimentalement comme force répul-

sive, et qui explique fort bien les formes coronales.

La couronne, et aussi la couche renversante du bord, ont été jusqu'à présent reconnues seulement pendant les éclipses et constituent le principal attrait du phénomène.

Le mot *chromosphère* (de χρῶμα, couleur) est employé parfois pour désigner l'ensemble des deux couches basses, la couche renversante étant alors présentée comme la base, la partie basse de la chromosphère. Cette extension donnée au mot *chromosphère* n'a pas été adoptée dans la Note actuelle; car elle apporte une confusion, une gêne dans l'exposition. Les deux couches basses ne sont pas séparées d'une manière très tranchée, mais elles sont bien différentes, puisque la couche renversante est plutôt blanche, a été découverte autrement et est observée autrement que sa voisine, aussi bien en dehors des éclipses que pendant les éclipses. Il y a avantage à employer deux mots bien distincts pour désigner deux choses qui, pratiquement, sont distinctes. Cette question devra être réglée par un Congrès international.

Éclipses suivantes. Enregistrement de la couche renversante. — Toutes les éclipses suivantes ont été observées avec le plus grand soin, et la science anglaise, en particulier, a organisé des missions pour chaque éclipse qui était visible sur un point accessible du globe. De plus, dans ces dernières années, le nombre

des missions a été augmenté notablement pour chaque éclipse, en même temps que la valeur des instruments employés. Malgré la faible durée du phénomène, les documents recueillis sont déjà considérables, et plusieurs questions importantes ont été éclaircies.

La photographie a été mise de plus en plus à contribution; elle est extrêmement précieuse pour ces phénomènes très courts dont elle peut seule enregistrer tous les détails. C'est à elle qu'on doit les progrès les plus récents sur les spectres lumineux et ultra-violets des trois couches, sur la composition de la couche renversante et sur les formes coronales.

Pour l'étude de la couche renversante, l'œil est insuffisant; il ne permet pas de faire des mesures et de vérifier si les raies brillantes du spectre éclair correspondent bien aux raies noires du spectre normal. En 1896, Lockyer et ses élèves, Shakleton et Fowler, ont obtenu les premières photographies du spectre éclair avec un prisme objectif, et les éclipses suivantes ont fourni de nombreuses épreuves similaires plus riches en détails. En particulier, les résultats dus à Evershed et à Hills sont fort intéressants, et la mission que l'auteur de cette Note a organisée, pour l'éclipse de 1900, a obtenu pour la première fois le spectre ultra-violet entier, et une série d'épreuves très rapprochées, fournie par un cinématographe.

Les résultats acquis à l'heure actuelle sont les suivants : La couche renversante n'est pas

absolument distincte de la chromosphère; car, sur les épreuves précédentes, qui donnent en même temps les deux couches, les vapeurs diverses s'échelonnent depuis le sommet de la chromosphère jusqu'à la surface même du Soleil; il y a seulement beaucoup plus de vapeurs dans la couche la plus basse, qui forme ainsi un bloc à part. Les vapeurs les plus hautes sont aussi en général les plus légères (la légèreté étant estimée par le poids atomique), mais il y a des exceptions curieuses qui sont dues, soit au pouvoir émissif exceptionnel de certaines radiations, c'est-à-dire à une propriété spéciale de l'atome, soit, comme l'a supposé Lockyer, à la dissociation de cet atome en composants plus légers.

Si, d'autre part, on compare les raies brillantes aux raies noires ordinaires, on trouve une correspondance nette, avec les restrictions suivantes : il y a de petites différences dans les intensités, les raies brillantes se rapprochant plutôt des raies de l'étincelle d'induction, et les raies noires de celles de l'arc électrique. En fait, la couche mérite bien d'être qualifiée de *renversante* et la grande loi de Kirchhoff sur l'émission et l'absorption des vapeurs est vérifiée dans la majorité des cas.

Structure de la couronne. Variations en accord avec la période des taches. — La couronne est l'objet principal des recherches; depuis 1860, elle est photographiée avec des

appareils de puissance croissante, avec des lunettes longues de plusieurs dizaines de mètres. Les images obtenues sont magnifiques et montrent les détails de la structure. La couronne apparaît formée de filaments contigus et enchevêtrés, en général normaux et dus à la force répulsive émanée de l'astre. Parfois, les filaments s'élèvent à des hauteurs énormes. En 1898, Maunder a photographié des rayons coronaux ayant la longueur de sept diamètres solaires, et Newcomb en a observé à l'œil qui étaient encore plus longs.

La belle série des épreuves actuelles occupe quatre périodes undécennales; or, elle montre une corrélation nette entre les variations de la couronne et les variations des taches. Les jets coronaux les plus importants semblent suivre les taches et se rapprochent avec elles de l'équateur. Aux années de minimum, la couronne a un aspect spécial caractéristique et un aspect également caractéristique, mais différent, au moment du maximum. De même la raie verte caractéristique des gaz de la couronne est forte, haute et répartie également autour du bord, dans une année de maximum; dans les environs du minimum, elle est faible et limitée à l'équateur. Cette corrélation est très importante, car elle prouve que les variations périodiques de la surface solaire ne sont pas localisées, mais s'étendent aux dépendances les plus éloignées.

Rapports de la couronne avec les couches plus

basses. Amas de particules dans la chromosphère. — D'après ce qui précède, les jets coronaux les plus marquants sont probablement liés aux taches et doivent émaner d'elles, ou des facules voisines, ou de la couche renversante, de la chromosphère et des protubérances qui sont au-dessus.

Les théories les plus estimées admettent cette dépendance; mais est-elle vérifiée par l'expérience? Or, sur les épreuves des éclipses, les jets coronaux sont vus au bord solaire, de profil, les uns derrière les autres, et enchevêtrés; il est bien difficile de fixer près du bord solaire le point précis de la surface ou de l'atmosphère, duquel ils émanent. Christie, sur les belles épreuves coronales qu'il a obtenues, a signalé des protubérances en rapport avec des jets coronaux; mais toutes les protubérances ne sont pas dans ce cas. Un seul fait bien positif a été indiqué par Perrine en 1901, qui est une année de minimum. L'épreuve de la couronne, obtenue par lui, montrait une pertur bation en un seul point, et ce point était voisin d'une tache, la seule de la surface, qui passait alors au bord.

Cette observation ne décide pas d'ailleurs si le jet coronal émane de la surface solaire ou des deux couches de vapeurs au-dessus. Tout récemment, à propos de l'éclipse de 1905, Deslandres a posé la question autrement. La chromosphère et les protubérances sont présentées généralement comme formées seulement de gaz brillants, mais

contiennent-elles aussi des particules en quantité notable, émettent-elles un spectre continu, en même temps que les radiations des gaz? Déjà plusieurs auteurs, Hastings, Oppolzer et Halm, pour des raisons théoriques, ont admis dans les couches basses l'existence de particules nombreuses, susceptibles de jouer un rôle important; et, récemment, la question a été reprise par Véry et Schuster. Mais les données et vérifications expérimentales font presque absolument défaut. Tacchini, en 1886, a appelé l'attention sur des protubérances, dites *blanches*, qui contiennent des particules et pas d'hydrogène, mais qui sont plutôt des masses coronales. Dans l'éclipse de 1900, Tacchini et Ricco ont signalé des aigrettes blanches dans des protubérances hydrogénées à spectre continu; mais l'observation ne donne pas le point précis d'émission du spectre continu.

Pour éclaircir tous ces points, Deslandres, en 1905, aidé par Blum, a photographié les protubérances avec des écrans colorés spéciaux qui arrêtent les radiations gazeuses et ne laissent passer que la lumière du spectre continu. L'appareil donne ainsi seulement l'image des particules; or, il a montré dans plusieurs protubérances des amas brillants de particules, plus brillants que les régions voisines de la couronne et réunis à la base de la protubérance. Ricco, avec des appareils différents, a été conduit à des résultats analogues pour les mêmes protubérances.

La couche renversante [1], la chromosphère et les protubérances doivent contenir des particules en quantité notable, de même, d'ailleurs, que l'atmosphère terrestre; et, pour l'anneau des éclipses tout entier, on peut avoir trois images distinctes : l'image ordinaire formée des gaz et particules confondus, l'image des gaz seuls dans le spectre, et enfin l'image des particules seules. La comparaison de toutes ces images donnera des résultats intéressants sur la liaison des particules entre elles et avec les gaz dans les trois couches.

La question des mouvements généraux de la couronne a été aussi posée. Dans quelle mesure l'énorme volume de la couronne participe-t-il à la rotation de la surface solaire, rotation qui, à certains égards, est si curieuse? Le problème a été abordé en 1893 par Deslandres avec le spectroscope, et ensuite par Belopolski et Campbell dans des conditions meilleures; mais aucun résultat net ou général n'a été encore obtenu.

Les questions nouvelles ou qui, abordées déjà, ne sont pas résolues, sont encore nombreuses pour la couronne et même aussi pour les autres couches.

---

[1] La couche renversante, pour des raisons diverses, est supposée contenir beaucoup de particules, surtout à sa partie supérieure.

CHAPITRE V.

ÉTUDE DE LA COUCHE MOYENNE EN DEHORS DES ÉCLIPSES ET AU BORD EXTÉRIEUR.

Insuffisance des observations d'éclipses. — De 1868 à 1906, c'est-à-dire dans un intervalle de 39 années, le nombre des éclipses totales est exactement de 24, avec une durée moyenne de $3^{min}6^{sec}$. Un astronome qui, pour chacune, aurait pu s'établir sur la ligne de totalité, d'accès parfois très difficile, aurait observé l'atmosphère solaire au plus pendant 1^h25^m; c'est bien peu, eu égard à la complexité du phénomène. On a remédié en partie à cette insuffisance par le grand nombre des stations d'observation et des appareils spéciaux pour chaque éclipse, et c'est ainsi que l'on a obtenu les résultats déjà notables, exposés précédemment, sur les deux couches supérieure et inférieure, la couronne et la couche renversante, qui, jusqu'à présent, sont observables seulement pendant les éclipses. Mais, de toute façon, les progrès sont très lents; si, d'une éclipse à l'autre, on observe un changement, on ne sait s'il est dû à une modification lente et progressive, ou s'il représente une phase de variations rapides.

Méthode spectrale de Janssen et Lockyer pour l'observation de la couche moyenne en dehors des éclipses. Histoire de la découverte. — Pour

la couche moyenne, c'est-à-dire pour la chromosphère et les protubérances, les conditions sont plus favorables; car le spectroscope qui, pendant l'éclipse de 1868, a décelé si nettement leur nature gazeuse, a fourni aussitôt après le moyen de les déceler et de les étudier en temps ordinaire, au bord solaire extérieur.

Les cinq observateurs qui, au moment de la totalité, ont reconnu dans les protubérances les raies fines caractéristiques des gaz (*voir* p. 66), ont tous été d'accord sur ce point que les raies fines étaient très brillantes. L'un d'eux, Janssen, qui observait aux Indes, alla plus loin; il eut aussitôt l'idée que ces raies devaient encore être visibles après l'éclipse, même avec la superposition de la lumière diffuse de notre ciel; et l'expérience, poursuivie dans la station même de l'éclipse, fut couronnée d'un plein succès. La lumière de notre ciel, avec la lunette seule, masque la protubérance; mais, après avoir passé par la fente fine et les prismes du spectroscope, cette lumière, qui est identique à la lumière solaire et offre, comme elle, un spectre continu à raies noires, s'affaiblit en un long ruban dans le spectre, alors que la lumière des protubérances, concentrée sur quelques raies fines [1],

---

[1] De plus, ces raies fines, en général, coïncident avec des raies noires du spectre solaire, ce qui leur permet de se détacher plus nettement, surtout lorsque la raie noire est plus large.

conserve son éclat. Les raies fines, avec une dispersion suffisante, se détachent nettement et décèlent la petite section faite par la fente dans la protubérance.

Quelques semaines après, et indépendamment [1], Lockyer, en Angleterre, arrivait au même résultat, et par une voie tout autre, qui vaut la peine d'être exposée, car la genèse des idées et des découvertes est toujours extrêmement intéressante. En mai 1866, apparut dans le ciel une étoile nouvelle, T de la Couronne boréale, qui, en 35 jours, passa de la 2e grandeur à la 9e; pendant un certain temps elle offrit un noyau, entouré d'une nébulosité, dont l'éclat était décroissant vers l'extérieur. Le spectre, étudié par Huggins en Angleterre, par Wolff et Rayet en France, avait ceci de particulier, qu'il présentait non seulement des raies noires, mais des raies brillantes qui se détachaient nettement sur le spectre continu et même le dépassaient. Huggins compara l'étoile à un Soleil qui aurait des protubérances très brillantes et très étendues, formées par de l'hydrogène incandescent. Lockyer fit alors la remarque que les protubérances de notre Soleil,

---

[1] Par une coïncidence curieuse, les deux Mémoires annonçant la découverte, l'un envoyé des Indes par Janssen et l'autre d'Angleterre par Lockyer, ont été présentés et lus le même jour à notre Académie des Sciences.

si elles sont gazeuzes, doivent pouvoir être décelées en temps ordinaire dans leur spectre et, en 1867, il les rechercha au bord solaire avec un spectroscope, mais sans les trouver, son appareil étant trop faible. L'année suivante, après l'éclipse, armé d'un appareil plus puissant et connaissant la partie du spectre où il fallait chercher, il les découvrit facilement.

En résumé, si l'idée première de la méthode est de Lockyer, la première application est de Janssen et très justement les deux noms ont été unis dans la découverte.

Premières recherches. Procédés de la fente fine et de la fente large pour le relevé des formes. — La méthode nouvelle, aussitôt connue, est appliquée de tous côtés, en Italie par Secchi et Respighi, en Allemagne par Zöllner, en Amérique par Young. Elle fournit des renseignements très utiles sur la répartition des protubérances et sur leurs variations de forme, parfois très rapides; elle permet de vérifier que la chromosphère, décelée pendant les éclipses par deux croissants successifs, séparés et opposés, est bien présente sur tout le bord solaire avec une épaisseur moyenne de 10 secondes d'arc; autrement dit, l'épaisseur est un peu plus grande que le rayon de la Terre.

Les premières recherches portent aussi sur le mode opératoire le meilleur à adopter, et, sur ce point, quelques détails sont nécessaires.

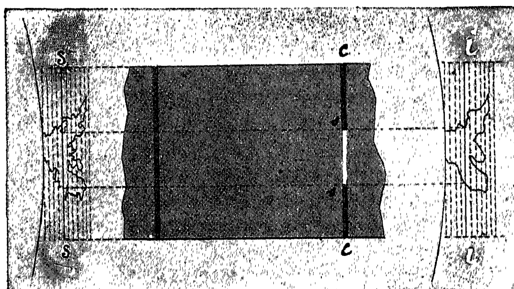
La méthode ne donne pas la protubérance

des éclipses, formée par plusieurs radiations, mais une image monochromatique, formée par une seule radiation de la protubérance; il y a autant d'images que de radiations, et ces images sont parfois assez différentes; mais on observe, en général, seulement la plus brillante, due à la raie rouge C de l'hydrogène.

Au début, le spectroscope était employé avec une fente fine, tangente ou normale au bord, et l'observateur déplaçait lentement la fente par rapport à la protubérance, en suivant avec la lunette les variations successives de la raie brillante, et en faisant, de distance en distance, des mesures de longueur et de position; c'est le procédé de la fente fine par sections successives que la figure ci-contre (n° 5) permet facilement de comprendre. Mais l'opération est longue et donne mal les petits détails de l'objet. Aussi Janssen a proposé d'utiliser la persistance des impressions lumineuses, pour obtenir immédiatement l'image exacte de la protubérance par la succession rapide des raies protubérantielles successives. Le spectroscope, qui est à vision directe, tourne rapidement autour de son axe et sa fente qui tourne avec lui parcourt toutes les parties de la protubérance qui est fixe. La raie protubérantielle, qui est isolée par une seconde fente, a les mêmes déplacements devant l'oculaire immobile. D'autre part, Zöllner et Lockyer, qui avaient eu la même idée, donnaient à leur spectroscope de petites oscillations très rapides. Ces trois essais n'ont donné aucun résultat,

mais ils sont à noter; car un dispositif analogue, convenablement modifié, a été repris plus tard avec la plaque photographique et un

Fig. 5.



Relevé d'une protubérance avec la fente fine du spectroscope et des sections successives.

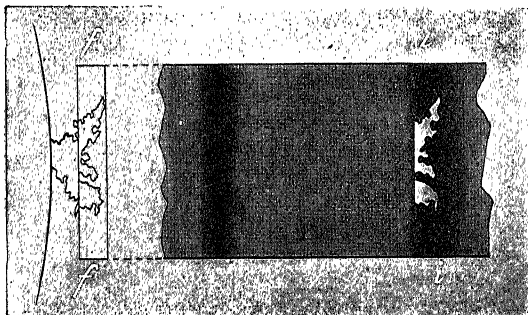
ss, section faite dans la protubérance par la fente du spectroscope; *cc*, raie brillante de la protubérance qui la décèle dans le spectre; *ii*, image de la protubérance reconstituée par sections successives.

mouvement du spectroscope non plus rapide, mais suffisamment lent, et a fourni, comme on le verra plus loin, l'enregistrement photographique des protubérances.

Le procédé le plus simple et le plus rapide a

été indiqué par Huggins et Zöllner (*fig.* 6). Il consiste à ouvrir la fente assez largement pour y introduire la protubérance en tout ou en

Fig. 6.



Relevé de la protubérance avec la fente large du spectroscope.

ff, fente large qui contient une partie notable de la protubérance; *ii*, image correspondante de la protubérance qui se détache dans le spectre.

partie. Si la dispersion est suffisamment grande, la protubérance apparaît avec ses formes exactes; les détails de faible éclat, il est vrai, sont perdus, et le spectroscope doit être plus puissant que dans les autres procédés.

Étude du spectre et des mouvements radiaux. — Depuis 1869, le procédé de la fente large est employé seul pour le relevé quotidien des protubérances et de leurs formes par l'observation oculaire.

La fente fine est employée concurremment, mais pour étudier le spectre entier de la protubérance, sa composition chimique et ses mouvements dans la direction de la Terre.

En temps ordinaire, les raies fines de la protubérance, autres que la raie rouge, se détachent aussi sur le spectre de notre ciel, lorsqu'elles sont assez intenses et assez hautes. Elles apparaissent mieux à une grande altitude, dans une station de montagne, où la lumière de notre ciel est diminuée. C'est ainsi que, en 1872, Young, sur le mont Sherman (2800^{m}), a fait une belle série de mesures sur le spectre protubérantiel, et il a signalé plus de 250 raies différentes d'origines très diverses. Dans les éclipses, les conditions sont encore plus favorables, et les raies les plus faibles peuvent être décelées.

Souvent, les raies observées avec la fente fine sont inclinées, tordues ou déplacées ; ce qui annonce un mouvement radial de la vapeur correspondante, c'est-à-dire un rapprochement ou un éloignement rapide par rapport à la Terre. La vitesse du mouvement, qui est proportionnelle au déplacement de la raie, augmente, en général, avec la hauteur au-dessus de la sur-

face (1); elle est souvent supérieure à 50^{km} et 100^{km} par seconde, et dans des cas exceptionnels, d'après certains auteurs, elle dépasse 600^{km} par seconde, c'est-à-dire la vitesse qui serait nécessaire pour rejeter la matière au delà du système solaire. L'étude de ces déplacements spectraux a une grande importance, et on note avec soin les protubérances qui ont des mouvements radiaux notables.

Ces perturbations extraordinaires peuvent avoir en effet un lien étroit avec les variations du magnétisme terrestre, et, à ce sujet, il faut toujours rappeler l'observation classique de Young, qui, le 3 août 1872, a noté trois mouvements successifs extraordinaires d'une belle protubérance, mouvements qui, à quelques minutes près, ont coïncidé avec des oscillations anormales de l'aiguille aimantée terrestre.

Pendant longtemps, les observations ont été purement oculaires; puis, en 1891, Hale et Deslandres ont employé la plaque photographique pour étudier les spectres bleus, violets et ultra-violets, et ils ont prolongé, dans cette région nouvelle, la liste des raies chromosphériques de Young. Cette étude les a conduits à une méthode pratique d'enregistrement des protubérances par la photographie, méthode

(1) De même, dans l'atmosphère terrestre la vitesse du vent augmente avec la hauteur au-dessus du sol.

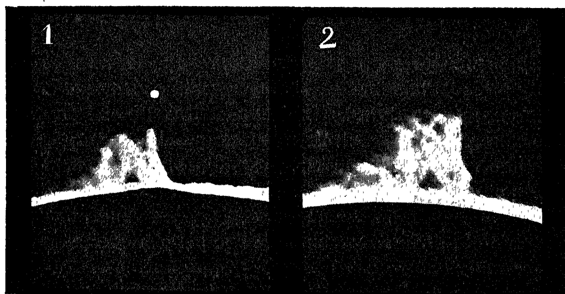
qui sera exposée dans les paragraphes suivants.

Variations rapides des protubérances. Division en deux classes d'après leur spectre. — Les protubérances ont les formes les plus variées et les aspects les plus divers. Elles sont comparables à des nuages, ou encore à des flammes ayant une structure filiforme, et elles subissent des changements parfois très rapides, qui, même, peuvent être qualifiés d'extraordinaires. Les auteurs ont décrit longuement les perturbations de la surface solaire autour des taches, mais combien plus grandes et importantes sont les variations de la matière atmosphérique.

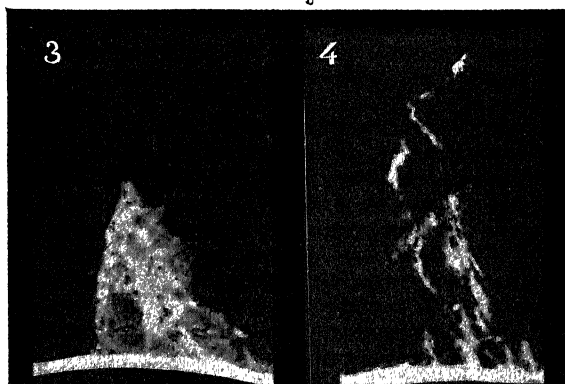
Les descriptions qui les rapportent ont pu paraître exagérées; mais, pour être convaincu de leur importance, il suffit d'examiner la planche ci-contre qui représente les phases successives d'une protubérance, phases que l'auteur a pu photographier en 1894 (*fig.* 7). Dans la dernière phase, la protubérance, qui était voisine du pôle, a atteint une hauteur énorme, égale au tiers du diamètre solaire.

Les protubérances se divisent en deux classes, surtout d'après la nature de leur spectre, qui comprend, ou seulement les raies dites *permanentes,* ou souvent aussi d'autres raies intenses.

Raies permanentes de la chromosphère. Hydrogène. — Les raies permanentes sont émises



A 14h 04m. A 16h 27m.



A 17h 0m. A 17h 40m.

Fig. 7. — Variations successives et rapides d'une belle protubérance polaire, le 31 mai 1894. Le petit cercle blanc de la case 1 représente les dimensions de la Terre à l'échelle employée.

en tout temps par la chromosphère entière et les protubérances, et correspondent aux gaz qui sont toujours présents dans la couche moyenne de l'atmosphère solaire. Elles offrent donc un intérêt de premier ordre. Les principales sont :

1° Les raies de l'hydrogène, ou au moins celles qui forment ce qu'on appelle le *premier spectre de l'hydrogène,* illuminé électriquement dans le laboratoire. D'autres raies plus nombreuses et en général plus faibles, qui constituent le *second spectre de l'hydrogène,* manquent dans le Soleil; elles ont été rapportées par quelques auteurs à des impuretés ou à des combinaisons de ces impuretés avec l'hydrogène, et leur absence dans le Soleil est une preuve à l'appui de cette opinion [1].

Le premier spectre, par contre, apparaît plus développé dans le Soleil que dans le laboratoire; il forme une série régulière de raies tout à fait remarquable, assimilable à une série d'harmoniques sonores, et sur laquelle il convient de donner quelques détails, ne serait-ce que pour montrer les liens étroits de l'Astronomie avec les autres sciences. Les raies successives du premier spectre sont reliées exactement à la série des nombres entiers par la

[1] Un travail tout récent de Dufour attribue, au contraire, les deux spectres à l'hydrogène, le premier étant dû à l'atome et le second à un édifice atomique plus complexe.

formule simple suivante, due à Balmer :

$$\frac{1}{\lambda_m} = A - \frac{4A}{m^2};$$

m étant le numéro d'ordre de la raie, compté à partir du rouge (de 3 à 31); λ_m la longueur d'onde correspondante, et A une constante. Or les quatre premières raies de la série ont été trouvées dans le laboratoire, les huit suivantes dans les étoiles blanches par Huggins, puis par Cornu dans le laboratoire; les cinq suivantes par Deslandres dans une belle protubérance, et les autres par Évershed dans la protubérance d'une éclipse. C'est l'étude du Soleil qui a permis la vérification étendue d'une loi très curieuse de mécanique atomique.

D'autre part, le spectre de l'hydrogène n'a pu encore être obtenu dans le laboratoire que par l'intervention électrique; les flammes si nombreuses de l'hydrogène et de ses composés, dues à une simple combustion, ne le donnent pas; d'où la conclusion probable que la lumière chromosphérique est d'origine électrique.

Hélium. — 2° Une autre raie permanente des protubérances, jaune et intense, n'a pu, au début, être rapportée à un élément connu; et, en 1869, on a donné le nom d'*hélium* (du mot grec, ηλιοσ, Soleil) au gaz qui la produit. Or, en 1895, le chimiste Ramsay a retrouvé cette raie jaune dans le gaz issu d'un minéral rare,

la clévéite ; et, guidé par elle, il a pu isoler le gaz nouveau, reconnu tout d'abord dans le Soleil.

L'hélium, à beaucoup d'égards, est remarquable ; il est monoatomique, il est le gaz le plus difficile à liquéfier et le plus léger après l'hydrogène ; de plus, il se dégage constamment de tous les composés du radium. Aussi a-t-on pu supposer que le Soleil contenait, sinon à sa surface, au moins dans son noyau, des quantités notables de radium, et même que ce corps extraordinaire, qui dégage constamment de la chaleur, était une des causes de l'énergie solaire.

Raies brillantes H *et* K *attribuées au calcium.* — 3° Deux raies brillantes violettes, reconnues avec l'œil par Young, qui sont à la limite de visibilité, mais actives sur les plaques photographiques. Elles correspondent aux raies noires H et K de Frauenhofer, qui sont de beaucoup les plus larges du spectre normal, et sont attribuées au calcium ; car tous les composés du calcium, illuminés dans le laboratoire, les émettent avec une grande intensité. Cependant, dans l'atmosphère solaire, une difficulté se présente. Les raies H et K du calcium y sont, en général, plus longues que les raies de l'hydrogène, et les vapeurs qu'elles décèlent s'élèvent donc à une hauteur plus grande que l'hydrogène. Or, ce fait est en contradiction avec la densité de vapeur relativement plus grande du calcium, dont le poids atomique, rapporté à celui de l'hydrogène, est égal à 39. Pour l'expliquer,

ockyer admet que le calcium est dissocié dans le Soleil, et que les raies brillantes H et K sont dues à l'un des corps composants, beaucoup plus léger. Cette particularité des raies solaires fournirait ainsi aux chimistes une indication fort utile.

Une autre explication paraît aussi acceptable. L'atome du calcium ne serait pas dissocié, mais émettrait, sous certaines conditions, quelques-unes de ses radiations beaucoup plus facilement que les autres. Les raies H et K auraient simplement, à un degré plus élevé, la propriété bien connue de la raie jaune du sodium, d'apparaître même avec une faible excitation et une très petite quantité de matière. L'avenir décidera si l'une ou l'autre de ces explications est à retenir. De toute façon, ces raies H et K sont les plus importantes, aussi bien dans la couche moyenne que dans la couche basse près de la surface.

Cet exposé des particularités spectrales de la couche moyenne a pu paraître un peu long; mais il était utile d'énumérer toutes les questions très diverses et fort intéressantes que son étude soulève. La matière solaire est d'ailleurs dans des conditions toutes spéciales, pour nous exceptionnelles; et, en particulier, la surface est à une température qui dépasse les plus hautes températures atteintes par Moissan dans son four électrique [1]. Elle peut donc avoir des

[1] La température de la surface, déterminée par

propriétés nouvelles, et cette remarque augmente encore l'intérêt qui s'attache à toutes les recherches solaires.

Protubérances quiescentes et éruptives. — Les protubérances, d'après la nature de leur spectre, sont ou quiescentes ou éruptives.

Les quiescentes émettent seulement les radiations dites *permanentes;* elles apparaissent sur tout le bord solaire, aussi bien près des pôles que dans le voisinage des taches; elles sont plutôt comparables à des nuages, et conservent souvent leurs formes pendant plusieurs jours.

Les protubérances éruptives ont, en plus des raies permanentes et principalement à leur base, d'autres raies, qui ne sont pas toujours les mêmes, mais qui, d'une manière générale, sont les plus fortes de la couche renversante. Cette dernière couche, comme on sait, est trop mince pour être visible au bord solaire en temps ordinaire; même avec une puissante lunette, elle est notée comme confondue avec le bord solaire, plus brillant, d'autant que, dans la très grande majorité des cas, les images solaires ne sont pas nettes, à cause de l'échauffement de l'air dans l'atmosphère et dans la lunette. Or, parfois,

---

la méthode de Wilson et Gray, considérée comme la meilleure, est de 6600°, d'après les dernières mesures de Wilson (1902), ce nombre étant d'ailleurs un minimum ; d'autre part, la température de l'arc électrique est de 3500°.

la couche offre une excroissance, une protubérance, due peut-être à une poussée interne, à une sorte d'éruption ; et cette excroissance, assez forte pour être bien visible au bord, est prolongée dans la couche moyenne par une autre protubérance, encore plus longue. On a alors la protubérance éruptive qui, le plus souvent, est confinée dans la région des taches et correspond à une facule de la photosphère, c'est-à-dire à une partie élevée de la surface.

La protubérance quiescente est simple, et paraît émaner seulement de la couche moyenne. La protubérance éruptive est double, ou même triple, puisqu'elle comporte les élévations simultanées de la couche atmosphérique la plus basse et de la surface elle-même. Elle est d'ailleurs plus brillante, soumise à des variations de forme et d'éclat plus rapides, à des mouvements radiaux plus notables.

Accord général des protubérances avec les variations des taches. — Les protubérances sont observées journellement depuis 1869. Les observatoires italiens, ceux de Rome et Catane en particulier, ont été organisés pour cette étude par Secchi, Tacchini et Ricco, et publient ensemble le relevé quotidien des protubérances depuis 1871. L'observatoire de Meudon a aussi une belle série due à Trouvelot, de 1883 à 1892 ; et il faut citer également les beaux travaux de Fenyi en Autriche, Sydgreaves et Cortie en Angleterre, Wolfer en Suisse. Les documents recueil-

lis à l'heure actuelle sont considérables et permettent de poser quelques conclusions générales.

Les protubérances se présentent à tous les points du bord solaire, mais souvent avec deux maxima principaux qui sont, l'un voisin des pôles, et l'autre voisin de la région des taches (Ricco et Mascari).

Si l'on considère l'ensemble des protubérances d'une même année, et les années successives, on reconnaît une grande oscillation générale, dont la période est celle des taches, mais avec des différences dans les dates des maxima. Lorsque les protubérances éruptives entrent seules en ligne de compte, l'accord avec les taches est plus étroit.

Ces petites divergences mises à part, les prolongements curieux de la couche moyenne, qui sont les protubérances, participent à la grande oscillation que subissent la surface et aussi la couche supérieure de l'atmosphère solaire (p. 73). Ce résultat est le plus important dû à la longue série d'observations commencée en 1869.

Photographie des protubérances. Enregistrement des formes et des vitesses radiales. — Les variations des protubérances éruptives sont parfois telles que l'observation oculaire ordinaire avec la fente large devient insuffisante. En pareil cas, la photographie est toujours supérieure; un enregistrement photographique et continu est seul capable de suivre les changements dans tous leurs détails.

La première image photographique des protubérances a été obtenue avec le procédé de la fente large, en 1874, par Young ; mais ce procédé laisse subsister les principaux inconvénients de l'observation oculaire.

Une méthode meilleure est celle que l'on peut appeler *mécanique*. Elle consiste à garder la fente fine, à déplacer d'un mouvement lent et continu l'image solaire par rapport à la fente ou la fente par rapport à l'image, et à donner un mouvement proportionnel à la plaque photographique par rapport à la raie protubérantielle, qui, naturellement, est isolée par une seconde fente fine. Les deux mouvements peuvent être réalisés de façons très différentes et, dans certains cas, se réduire à un seul. Lorsque le mouvement est suffisamment lent et assure à la plaque une pose suffisamment longue, le succès est certain (1).

La plaque montre ici nettement ses avantages par rapport à l'œil; car le dispositif, à certains égards semblable, essayé précédem-

---

(1) La pose totale est même facile à calculer. Si, par exemple, l'impression de la raie protubérantielle exige une seconde avec l'appareil immobile (et, en général, avec les plaques actuelles, une pose moindre est suffisante), et si la seconde fente est large de $\frac{1}{10}$ de millimètre, la pose totale en secondes est donnée par le nombre qui exprime, en dixièmes de millimètre, la largeur de l'image. Avec un soleil de $0^m,10$ la pose serait de 1000 secondes.

ment pour l'observation oculaire des protubérances (*voir* p. 78), n'a pas donné de résultats, simplement parce que l'œil n'accumule pas les impressions.

Braun a, le premier, en 1872, proposé un dispositif de ce genre pour la photographie des protubérances. L'appareil, qui est à un seul mouvement rotatif et convient seulement pour les petites images, n'a pas été construit, au moins par son auteur.

Lohse, en 1885, a réalisé un autre dispositif, également à un seul mouvement rotatif, mais sans obtenir aucun résultat net. Il employait la raie rouge de l'hydrogène, à une époque où on n'avait pas encore de plaques sensibles pour cette radiation.

En 1890, Hale a présenté un dispositif à deux mouvements rectilignes, qui convient aux grandes images et qui devait être employé avec les raies de l'hydrogène; puis, en 1891, il a adopté les raies violettes H et K du calcium, beaucoup mieux appropriées au but.

La même année (1891), Deslandres préconise aussi les raies H et K, en remarquant qu'elles s'accommodent d'une très faible dispersion. La découverte des protubérances, qui a été retardée par la faiblesse des spectroscopes employés au début, eût été facile avec ces radiations. Il propose en même temps un dispositif à deux mouvements, l'un rotatif, l'autre rectiligne, qui réalise un enregistrement plus continu que les appareils précédents.

Il propose, en outre, d'enregistrer non plus seulement les formes des protubérances, mais leurs vitesses radiales. Pour ce nouvel usage, la seconde fente doit être élargie (de $0^{mm},5$ à 2^{mm}), de manière à contenir la raie K même déplacée et un peu du spectre continu voisin à raies noires; et les mouvements de l'appareil, au lieu d'être continus, sont discontinus, et formés d'arrêts et de déplacements égaux. Les petites portions du spectre, juxtaposées dans l'image, reconstituent les formes des protubérances, mais générales seulement, et décèlent les vitesses radiales. Cet appareil à deux fins, quoique peu compliqué, n'a pu être construit que deux ans plus tard.

En 1892, Hale, ayant réalisé son dispositif, obtient la première photographie du bord solaire et de ses protubérances; et ces premiers essais ont conduit en même temps à d'autres résultats fort intéressants qui seront exposés dans le prochain Chapitre.

Les appareils précédents, qui donnent une image monochromatique du Soleil, sont appelés *spectrohéliographes*. Ils ont reçu depuis de multiples applications et sont actuellement en service courant dans plusieurs observatoires.

Remarques sur les particules incandescentes. — Dans les recherches étendues, décrites au cours de ce long Chapitre, il a été question des gaz et vapeurs de la couche moyenne et nullement des particules liquides et solides qu'elle

contient assurément aussi et en proportion notable. C'est que la méthode spectrale, employée en dehors des éclipses, ne décèle bien que les gaz ; elle est presque impuissante pour les particules, que, pour cette raison, la plupart des auteurs ne mentionnent même pas. Cet oubli est regrettable, car, dans notre atmosphère, qui est comparable à la chromosphère solaire, les particules ont une influence considérable, notamment sur la transparence et le pouvoir absorbant. Il est probable que les particules solaires ont un rôle analogue et même interviennent dans des phénomènes jusqu'ici mal expliqués.

Dans l'éclipse dernière (*voir* p. 75), les amas de particules ont pu être photographiés séparément et distingués des gaz dans de belles protubérances ; jusqu'à présent, on n'a pas obtenu nettement de résultat semblable en temps ordinaire. La présence des amas a été seulement signalée par le spectre continu que présentent parfois les protubérances extraordinaires.

Tel était le cas avec la protubérance classique de Young (5 août 1872) qui a coïncidé avec une perturbation de l'aiguille aimantée terrestre ; le spectre a montré, outre des mouvements radiaux énormes, de fortes bandes de spectre continu, qui annoncent des particules dues probablement à des condensations locales.

En 1892 et en dehors d'une éclipse, Deslandres et Hale ont photographié des spectres continus émis par des protubérances.

Or, l'action des perturbations solaires sur

le magnétisme terrestre est attribuée à de petites particules électrisées qui, étant repoussées par la pression de radiation, s'éloignent du Soleil vers la Terre avec une grande vitesse. Dans cet ordre d'idées, la reconnaissance, en dehors des éclipses, des gros amas de particules, de leurs formes et de leurs intensités dans la chromosphère, serait fort utile, et Deslandres a proposé récemment de l'organiser avec des appareils assez compliqués. Mais, comme des résultats bien positifs n'ont pas encore été obtenus, il est inutile de donner de plus amples détails.

CHAPITRE VI.

RÉVÉLATION EN TEMPS ORDINAIRE DES COUCHES BASSE ET MOYENNE, DANS LA DEMI-SPHÈRE ENTIÈRE TOURNÉE VERS LA TERRE.

Lacunes des recherches précédentes. Importance de la partie de l'atmosphère qui est intérieure au bord ou projetée sur le disque. Résultats récents sur cette partie nouvelle. — Les deux Chapitres précédents présentent l'état actuel de nos connaissances sur l'atmosphère extérieure au bord, observée pendant les éclipses et en dehors des éclipses. Les trois couches principales superposées de l'atmosphère, révélées par les éclipses, offrent chacune un mélange de gaz et de particules, mais avec les différences générales suivantes : la couche basse dite *renversante* comprend surtout des vapeurs lourdes, et la couche moyenne ou chromosphère des gaz légers, les deux couches ayant aussi des particules, dont l'importance peut être égale, mais qui sont plus difficiles à reconnaître et dont l'étude est seulement commencée. La couche haute ou couronne, d'autre part, est constituée presque exclusivement par des particules; et, à l'heure actuelle, elle est la seule dont les deux éléments constituants ont été facilement séparés.

Si l'on passe aux observations en dehors des

éclipses, qui ne s'appliquent qu'à la couche moyenne seule, l'insuffisance, en ce qui concerne les particules, est encore plus notoire ; les résultats fort intéressants du dernier Chapitre ne se rapportent qu'aux vapeurs ou à un seul des éléments constituants.

Les recherches précédentes, si remarquables à beaucoup d'égard, sont donc incomplètes sur quelques points ; or elles offrent encore une autre lacune, plus générale et plus importante. Elles ne s'appliquent qu'à une partie, et à une partie minime de l'atmosphère totale du Soleil qui est tournée vers la Terre ; elles ne donnent que la partie extérieure au bord solaire, dévoilée par les éclipses. La partie beaucoup plus étendue qui se projette sur le disque, à l'intérieur du bord, leur échappe. Or, si l'on remarque que la chromosphère extérieure au bord a une épaisseur moyenne de 10″ d'arc, et que le rayon du Soleil dépasse en moyenne 960″, la partie de la chromosphère, encore inexplorée, occupe en projection une surface cinquante fois plus grande que la partie des éclipses.

La lacune est donc vraiment sérieuse. Or, elle a été comblée récemment, de 1892 à 1894, par Hale et Deslandres, grâce à l'étude raisonnée du spectre solaire photographique et à l'emploi de spectrographes enregistreurs spéciaux. La méthode nouvelle décèle la chromosphère entière, intérieure et extérieure au bord, et telle qu'on la verrait si la surface ou photosphère était enlevée ; elle utilise une seule ra-

diation simple [1], ainsi que dans le relevé des protubérances par la méthode de Janssen et Lockyer ; et elle donne les formes des plages brillantes de la vapeur et aussi leurs mouvements radiaux dans la demi-sphère entière tournée vers la Terre.

Bien plus, la méthode s'applique non seulement aux vapeurs de la couche moyenne, mais aussi aux vapeurs beaucoup plus nombreuses de la couche renversante, jusqu'à présent inaccessible en temps ordinaire même au bord extérieur. En réalité, elle décèle toutes les vapeurs des deux premières couches et dans l'atmosphère entière.

Elle est absolument générale et fournit une solution complète du problème.

Premières découvertes de l'année 1892. *Vapeurs brillantes à l'emplacement des facules du disque.* — A première vue, il semble extrêmement difficile d'isoler la chromosphère qui est projetée sur le disque solaire ; car, au bord extérieur, cette chromosphère est facilement masquée par la lumière de notre ciel (qui a le même spectre que le Soleil) ; à plus forte raison est-elle masquée, lorsqu'on ajoute en plus

---

[1] La méthode utilise une seule radiation dans les applications ordinaires ; mais, avec des appareils spéciaux, dits *spectrohéliographes polychromes* (Deslandres, 1904), elle donne des images formées par plusieurs radiations.

la lumière du Soleil lui-même, extrêmement éclatante. Au bord extérieur, la raie rouge de la chromosphère, qui est la plus forte de l'hydrogène incandescent, est toujours brillante; mais, sur le disque, elle est noire ou relativement noire, sauf dans des cas exceptionnels. Les obstacles semblent donc s'accumuler, lorsque, du bord extérieur, on passe au bord intérieur.

Quoi qu'il en soit, de 1860 à 1892, il est fait mention parfois de vapeurs brillantes observées sur le disque même de l'astre, mais sur des points exceptionnels de la surface, tels que les taches. Là, justement, le fond brillant du disque fait défaut en très grande partie, et les conditions sont plus favorables.

Tous les auteurs ont signalé dans les taches des plages rouges, appelées *voiles roses*, qui ont la même couleur que la chromosphère du bord extérieur dans les éclipses. Ces plages, examinées au spectroscope, offrent, en général, les raies de l'hydrogène brillantes; elles correspondent à des masses énormes d'hydrogène incandescent, qui se détachent sur la cavité noire de la tache et dont le niveau, par rapport à la surface même de l'astre, reste d'ailleurs indéterminé.

Young, de 1872 à 1874, et en particulier sur le mont Sherman, a relevé un fait fort intéressant. Après avoir reconnu, avec l'œil, que les raies brillantes H et K, attribuées au calcium, sont constamment brillantes au bord solaire extérieur, il trouve, toujours avec l'œil, que

ces mêmes raies sont aussi constamment brillantes et fines sur les taches et, pour employer ses propres expressions, sur les taches et leurs alentours immédiats. L'hydrogène, dans les mêmes conditions, présente des raies brillantes, seulement par intervalles. Cette prédominance du calcium brillant est un fait curieux, que Young annonce, sans rechercher si la vapeur correspondante est au-dessus ou au-dessous de la surface solaire.

Cependant les raies violettes H et K, qui, étant à la limite extrême de visibilité du côté de l'ultra-violet, sont encore discernables avec l'œil, ont nécessairement une action très forte sur la plaque photographique; et lorsque, plus tard, en 1890 et 1891, la question de la photographie des protubérances a été posée (*voir* p. 96), les premiers essais avec les raies de l'hydrogène sont vite abandonnés, et les raies brillantes H et K sont adoptées rapidement par Hale et Deslandres, comme étant supérieures à toutes les autres.

Hale, en 1892, a réalisé à Chicago le spectrographe enregistreur, appelé par lui *spectrohéliographe,* qu'il avait projeté pour la photographie des protubérances (*voir* p. 94); l'appareil est à deux mouvements rectilignes et donne l'image monochromatique du Soleil, la raie isolée tout d'abord étant la raie K du calcium. Il obtient, comme on l'a dit plus haut, la première épreuve complète des protubérances extérieures, et, de plus, appliquant son appareil

non plus seulement au bord extérieur, mais au disque entier de l'astre, il obtient une image nouvelle qui offre les particularités suivantes : elle a des plages brillantes qui coïncident avec les facules de la surface et, alors que les facules sont à peine visibles au centre du Soleil, les plages correspondantes de l'image y sont brillantes, aussi brillantes qu'au bord. Ces résultats sont publiés dans le numéro de février de l'*Astrophysical Journal.*

Au même moment, le 8 février 1892, Deslandres présentait à l'Académie des Sciences des résultats analogues, obtenus à Paris avec des appareils tout différents. Il n'avait pas encore le spectrohéliographe proposé et décrit en 1891, pour la photographie des protubérances, et qui sera réalisé seulement en 1893, lorsque le Ministère aura accordé les crédits demandés déjà en 1891 (1). Il opère avec un spectrographe ordinaire à une seule fente, et par la méthode des sections successives, comme les premiers observateurs des protubérances en 1868 et 1869, et il constate que les raies H et K sont brillantes,

(1) Ce détail fait toucher du doigt les différences entre les moyens d'action dont dispose la Science en Europe et en Amérique. De l'autre côté de l'Atlantique, les ressources mises à la disposition des chercheurs sont considérables et leur permettent d'appliquer rapidement toutes leurs idées. En France, la modicité des crédits et une longue attente sont la règle.

non seulement au-dessus des taches, mais au-dessus des facules. De plus, les raies, observées avec une forte dispersion, sont doubles, ayant entre elles une raie fine noire qui est renversée. Cette particularité annonce même une vapeur composée de deux couches différentes superposées, la couche haute émettant une radiation plus faible et plus fine. L'observation faite dans ces conditions est longue et donne mal les petits détails des formes des vapeurs, exactement comme dans le cas des protubérances du bord extérieur (page 81); mais elle fournit en plus, comme on le verra plus loin, d'autres renseignements fort utiles. D'ailleurs l'auteur ajoute : Les spectrographes enregistreurs, proposés pour la photographie des protubérances, s'appliquent aussi à ces nouvelles vapeurs projetées sur le disque ; ils donneront les formes et les mouvements radiaux de ces vapeurs non seulement au bord solaire extérieur, mais dans la demi-sphère entière tournée vers la Terre.

Le mois suivant, en mars 1892, il annonce que les vapeurs ainsi décelées avec le spectrographe ordinaire au-dessus du disque, et assimilées à des protubérances, forment à un certain moment un véritable anneau continu parallèle à l'équateur.

De son côté, Hale, avec son spectrohéliographe, obtient la première série un peu longue (de 1892 à 1893) des nouvelles images appelées par lui *photographies de facules,* et il donne le nom de *réseau faculaire* à l'ensemble des pe-

tites plages brillantes de l'image, qui sont rapportées aux petites facules de la surface, et sont visibles partout sur ses images, sauf dans le voisinage des pôles (1).

Discussion sur la situation exacte des vapeurs par rapport à la surface. Révélation de la chromosphère entière de l'astre. — Les résultats des deux observateurs, obtenus avec des appareils différents, s'accordent sur plusieurs points; mais ils diffèrent sur un point qui est capital, sur la situation exacte des vapeurs dans le Soleil. Hale les place au-dessous de la surface et, en particulier, dans les parties hautes qui sont les facules. Deslandres, au contraire, les place au-dessus de la surface, dans l'atmosphère même de l'astre. De là une discussion très vive qui a pris fin seulement dans les derniers mois de l'année 1894.

Pour le point spécial en litige, le simple spectrographe ordinaire convient mieux que le spectrohéliographe; car il donne, outre la raie de la vapeur, le spectre entier de la surface voisine et le spectre du bord. Le spectrohéliographe, qui isole la raie intéressante et l'intègre en quelque sorte, écarte toute autre lumière.

(1) Aux années de maximum de taches, comme en 1892 et 1893, les facules de la surface s'étendent jusqu'aux pôles, les plus grandes facules restant confinées près des taches.

Deslandres présente les faits suivants :

1° Les images des vapeurs ne sont pas identiques aux images des facules, mais notablement plus larges; avec le spectroscope ordinaire, la raie brillante est en général plus longue que le renforcement du spectre continu qui annonce la facule [1].

Le résultat est le même si l'on compare directement et avec soin les images des vapeurs et les images des facules. Maunder l'a vérifié avec les images du spectrohéliographe de Deslandres, obtenues à Paris en avril 1894, et les images de facules de l'observatoire de Greenwich. Même, sur les images de Paris, les vapeurs recouvrent parfois les taches elles-mêmes, au moins en partie.

2° Les raies des vapeurs ont des déplacements radiaux que ne subissent pas les raies noires voisines.

3° Les raies H et K sont brillantes et doubles, non seulement à l'emplacement des facules, mais sur la surface entière du disque; elles sont alors seulement beaucoup plus faibles et plus

---

[1] D'ailleurs, si, d'une manière générale, les raies brillantes du calcium correspondent aux renforcements du spectre continu, il y a des exceptions qui ne sont pas très rares. Parfois le renforcement du spectre continu est notable et la raie brillante faible ou presque imperceptible. Le fait inverse se présente également.

difficiles à distinguer ([1]). Pour les reconnaître sûrement, il faut employer un spectroscope puissant qui sépare bien les deux composantes de la raie et le spectre continu voisin, éliminer la lumière diffuse de l'appareil, et choisir la pose juste convenable.

En général, les composantes brillantes qui, en dehors des facules, sont faibles et même dissymétriques près du centre du disque, sont au contraire égales, bien nettes, et séparées par un intervalle croissant, lorsqu'on s'approche du bord intérieur. Or, à ce bord, les composantes de la raie à l'intérieur sont toujours prolongées exactement par les composantes de l'extérieur, sans solution de continuité ; il n'y a pas de distinction à établir entre les vapeurs séparées par le bord. Celles de l'extérieur décèlent la chromosphère ordinaire observée au bord depuis 1868; donc aussi les vapeurs de l'intérieur décèlent la même chromosphère, projetée sur le disque.

Comme cette expérience est décisive pour le point à éclaircir, ses principaux détails ont été reproduits dans le dessin schématique ci-contre

---

([1]) Les raies doubles faibles sont plus ou moins faciles à distinguer suivant les régions de la surface et suivant les jours; leur visibilité est un élément à considérer, car elle doit être en rapport avec la proportion plus ou moins grande des particules de condensation et avec le pouvoir absorbant de l'atmosphère solaire.

(*fig.* 8), qui montre les aspects successifs habituels de la raie brillante sur les taches, les facules autour de la tache, les points ordinaires de la surface, et particulièrement aux bords intérieur et extérieur. Des deux côtés du bord, les raies sont les mêmes; elles sont notablement plus intenses et larges qu'au centre, à cause de l'épaisseur plus grande des vapeurs traversées par le rayon lumineux. On a cherché aussi à représenter la dissymétrie des composantes brillantes qui est le cas le plus fréquent pour les points éloignés des bords. Cette dissymétrie, plus ou moins accentuée suivant les régions, est importante à considérer, puisqu'elle annonce un mouvement relatif des vapeurs hautes de la chromosphère par rapport aux vapeurs basses; le sens est tel qu'il correspond à un éloignement de la Terre ou à un rapprochement vers la surface du Soleil. Pour la commodité du dessin, la chromosphère et la tache ont été très élargies.

Hale a objecté que les images de Chicago ne présentent pas de petites plages brillantes aux pôles, où cependant la chromosphère est aussi présente. Mais les épreuves de Paris, faites, il est vrai, dans des conditions plus favorables, avec un spectrohéliographe de faible dispersion, mieux approprié au but, ne présentent pas cette particularité; les petites plages brillantes y sont réparties également sur toute la surface.

En résumé, la conclusion présentée au début s'impose. Les raies brillantes H et K du calcium

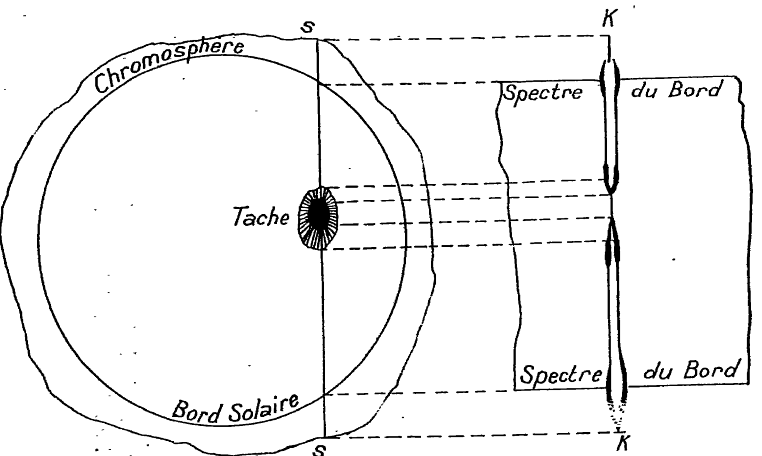


Figure 8 schématique. — *ss*, section faite par la fente du spectroscope dans le Soleil dont la chromosphère et la tache sont très agrandies ; K, raie brillante, attribuée aux vapeurs du calcium, qui apparaît au milieu de la large raie noire K du spectre normal ; elle est simple et fine au-dessus des taches et à la partie supérieure de la chromosphère, et double sur les autres points, étant alors divisée en deux par une raie noire centrale qui annonce une vapeur plus froide superposée. — Les raies brillantes et noires (représentées ici élargies) sont plus larges de chaque côté du bord, là où les deux vapeurs ont la plus grande épaisseur dans la direction du rayon visuel.

sur le disque, et les images monochromatiques avec ces raies décèlent la chromosphère entière de l'astre, telle qu'on la verrait si la photosphère était enlevée.

De plus, les plages les plus brillantes de la chromosphère correspondent aux facules et aux régions les plus brillantes et les plus hautes de la surface. Les petites plages brillantes, d'autre part, forment un réseau que l'on peut appeler *réseau chromosphérique.*

Particularités de la chromosphère projetée sur le disque. — La chromosphère projetée sur le disque se présente à l'observateur terrestre tout autrement que la chromosphère du bord extérieur. Cette dernière est vue de profil, et les parties qui attirent le plus l'attention sont les parties les plus hautes. La chromosphère du disque, d'autre part, est vue de face, et les parties les plus hautes disparaissent au contraire devant les parties basses, de beaucoup plus brillantes. Les parties hautes sont représentées par la petite raie noire centrale, qui n'intervient que pour une part insignifiante dans l'image, formée en réalité par la raie brillante double, et par les couches basses chromosphériques jusqu'à la hauteur de 3″ à 4″ d'arc (1). La petite raie noire, d'ailleurs, avec un appareil

(1) Cette image de la chromosphère sur le disque, qui donne l'image des vapeurs jusqu'à 3″ d'arc, est un peu plus large que l'image même de la surface.

beaucoup plus dispersif, peut être isolée seule à son tour par la seconde fente, et fournir, comme on le verra plus loin, l'image spéciale des parties hautes.

L'image des raies brillantes et de la chromosphère s'obtient aisément sur le fond éclatant du disque pour les raisons suivantes : l'intensité de la raie brillante croît notablement lorsqu'on s'approche de la surface, et cette raie trouve dans le spectre un fond relativement sombre, constitué par la large raie noire du calcium. La largeur de cette raie est même telle qu'un spectrohéliographe de faible dispersion, avantageux d'ailleurs à d'autres points de vue, suffit pour obtenir de bonnes images.

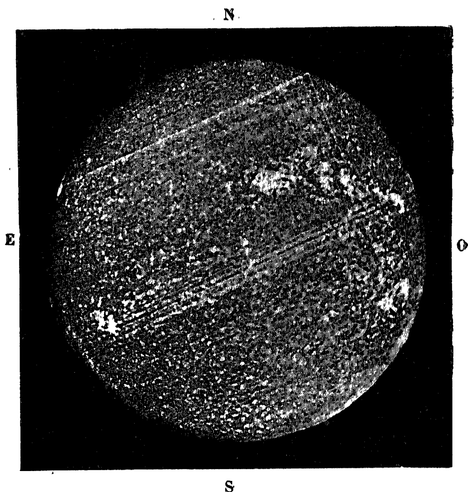
Les différences d'éclat des parties basses et hautes de la chromosphère sont indiquées nettement par les temps de pose nécessaires pour les obtenir. Avec le spectrohéliographe de Paris et un ciel pur, la chromosphère du disque, formée par les parties basses, exige une pose de 2 minutes; mais, pour les protubérances du bord extérieur, il faut poser 10 minutes ou même beaucoup plus. Les figures 9 et 10 représentent les chromosphères du disque et du bord, obtenues le même jour à Paris. La première offre nettement les plages brillantes au-dessus des facules et est beaucoup plus riche en détails nets que l'image de la surface donnée par la chambre photographique ordinaire [1].

---

[1] Il eût été bon, évidemment, de reproduire, à

Fig. 9.

Chromosphère du disque (en vraie grandeur), le 11 avril 1894, pose de $11^h 28^m$ à $11^h 30^m$.



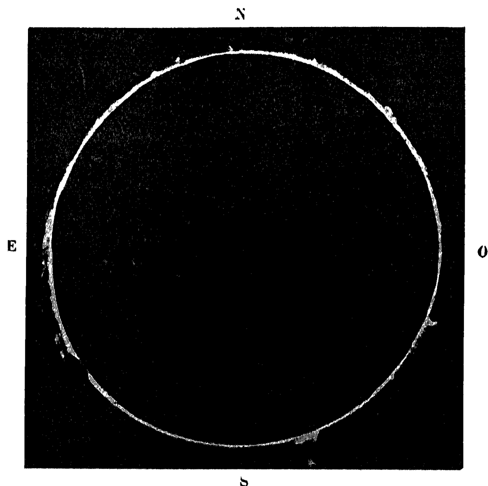
Obtenue à Paris avec le sidérostat de Foucault, un objectif de $0^m,12$ et un spectrohéliographe à faible dispersion (un seul prisme) qui isole la raie K du calcium. Les stries inclinées sont dues aux poussières presque inévitables des deux fentes et à leurs irrégularités; elles indiquent la direction du mouvement donné à la ligne lumineuse qui forme l'image.

---

côté de la figure 9 qui représente la chromosphère

Fig. 10.

Chromosphère du bord et protubérances,
le 11 avril 1894, de $14^h 17^m$ à $14^h 27^m$.



Obtenue avec le même appareil et une pose plus longue, le disque étant masqué presque complètement par un diaphragme circulaire.

---

entière du 11 avril 1894, l'image de la photographie ordinaire, obtenue le même jour, qui représente la surface de l'astre. Mais cette dernière image a peu de détails et des détails peu visibles, qui auraient été perdus dans la reproduction sur papier ordinaire.

La seconde offre une protubérance détachée du bord.

La chromosphère totale et la radiation brillante du calcium ne représentent qu'une partie très faible de la radiation totale de l'astre. Pour le vérifier, on dirige le spectrographe directement sur le Soleil, en écartant l'objectif de projection. Toutes les parties du Soleil interviennent alors également pour la formation du spectre, qui est exactement celui que donnerait le Soleil, s'il était aussi éloigné de la Terre que les étoiles et réduit à un point. Or le spectre montre, au milieu des larges raies noires H et K, deux composantes brillantes, mais faibles, et en général dissymétriques, qui correspondent à la chromosphère entière de l'astre. Cette expérience, due à Deslandres, montre que le Soleil est une étoile à raies brillantes [1]; elle fournit aussi une méthode capable de déceler la chromosphère des étoiles et son intensité relative.

Images spéciales du Soleil données par les raies noires du spectre. Révélation de la couche renversante entière. — Les raies brillantes du calcium et leurs images, à certains égards exceptionnelles, sont les premières étudiées; aussi les a-t-on décrites avec détails; l'exposé pourra

---

[1] Les étoiles, qui ont dans leur spectre une ou plusieurs raies brillantes, ont une place à part dans les catalogues consacrés aux spectres stellaires.

être plus bref pour les résultats sur les autres radiations et les autres vapeurs.

La lumière de la chromosphère, comme on l'a vu plus haut (*voir* p. 89), est probablement d'origine électrique, et Deslandres a pensé que, dans ces conditions, toutes les vapeurs voisines devaient être illuminées en même temps, et avoir, comme les vapeurs du calcium, des maxima de lumière au-dessus des facules. Les vapeurs ordinaires sont révélées par les raies noires ou relativement noires qui, d'après la loi même de Kirchhoff sur l'absorption, doivent avoir un éclat égal à celui qu'elles ont dans la vapeur, ou un éclat un peu supérieur.

Deslandres a été ainsi conduit, en 1894, à isoler avec son spectrohéliographe, non plus seulement les raies brillantes H ou K, mais la large raie noire du même nom ou une partie de cette raie, et les raies noires voisines les plus larges dues au fer, à l'aluminium, au calcium, au carbone. Or les images obtenues montrent aussi des plages brillantes au-dessus des facules et, comme les précédentes, aussi brillantes au centre du disque qu'aux bords; mais avec les différences suivantes : les plages brillantes sont moins étendues que celles des images précédentes et se rapprochent de l'image même des facules; de plus, l'ombre et la pénombre des taches, souvent masquées dans les images précédentes avec la raie brillante du calcium, apparaissent nettement sur les nouvelles images qui ont d'ailleurs chacune leurs particularités spéciales.

Les images nouvelles sont donc intermédiaires entre les images de la surface et celles de la chromosphère (fournies par les raies brillantes H et K); et, en effet, elles représentent des vapeurs qui appartiennent à une couche intermédiaire, la couche renversante. Or, jusqu'à présent, cette dernière couche n'avait pu être observée que dans les éclipses totales, pendant les 2 secondes du commencement et de la fin de la totalité. Ces études nouvelles avec les raies noires révèlent donc une couche importante, jusqu'alors inexplorée sur le disque à l'intérieur du bord, et inobservée en temps ordinaire.

Ces premières recherches ont été faites avec le spectrohéliographe de faible dispersion (un collimateur de $0^m,50$, un prisme de flint de 60^o et une lunette de 1^m) qui avait été organisé pour les images avec les raies brillantes; aussi ontelles porté sur une douzaine de raies noires seulement; mais un appareil plus dispersif permettrait d'isoler des raies noires beaucoup plus nombreuses, ou même chacune des 20000 raies noires reconnues par Rowland dans le spectre solaire; ce qui exigerait, il est vrai, des poses plus longues pour l'obtention de l'image et aussi des appareils beaucoup plus puissants.

De toute façon, l'application aux raies noires ouvre à l'investigation un champ d'études tout nouveau et extrêmement vaste; et en faisant cette remarque, en 1894, Deslandres ajoute qu'une même radiation peut donner plusieurs images différentes dues aux couches superpo-

sées d'une même vapeur. Les raies H et K, en particulier, comprennent trois parties distinctes : la large raie noire, la plus large du spectre solaire, la raie brillante double et une petite raie noire centrale, qui correspondent à la couche renversante, à la partie basse de la chromosphère proprement dite et à la chromosphère supérieure ; d'où trois images distinctes qui exigent, pour être obtenues, une dispersion croissante [1]. La troisième, d'après les essais faits avec le spectrographe ordinaire, ne doit pas avoir les mêmes plages brillantes que les deux autres, et est particulièrement intéressante.

Deslandres a même proposé, en 1893 et 1894, de rechercher avec le spectrohéliographe et les raies noires l'image de la couronne ou, d'une manière générale, des amas de particules projetés sur le disque. La raie noire est en effet formée par la lumière de la vapeur correspondante, à laquelle s'ajoutent une petite portion du spectre continu du disque non absorbée par la vapeur, et les spectres continus des amas de

---

[1] Le mot *chromosphère* est employé dans cette Notice avec son sens restreint (p. 69), et désigne seulement la couche moyenne parmi les trois couches principales de l'atmosphère. Or la chromosphère, au moins avec la vapeur de calcium, se divise naturellement en deux parties. Pour éviter les confusions, on pourrait appeler ces parties des *sous-couches*, le mot *couche* étant réservé pour les trois grandes divisions de l'atmosphère entière.

particules de l'atmosphère. Or, cette troisième partie, en particulier lorsque la vapeur est élevée dans l'atmosphère, et offre une raie bien noire, peut l'emporter sur les deux autres; et l'image obtenue serait alors celle des amas de particules.

En résumé, la méthode nouvelle s'annonce comme capable de déceler toutes les vapeurs de l'atmosphère entière avec leurs intensités particulières, et aussi peut-être les principaux amas de particules. Elle exigera seulement une longue série de recherches, poursuivie avec des appareils astronomiques et spectraux d'une grande puissance.

Remarques générales sur les spectrohéliographes. — Le spectrohéliographe est donc un appareil très précieux. Il est d'ailleurs simple et forme son image par le mouvement d'une ligne lumineuse, limitée par une fente, exactement comme certains appareils de photographie panoramique, employés déjà en 1857.

Ses principales applications sont fournies par les raies noires; or, si l'on se reporte aux raisonnements simples, basés surtout sur la loi de Kirchhoff, qui ont conduit à former l'image de ces raies noires, on voit que le spectrohéliographe aurait pu être appliqué utilement au Soleil, à partir de 1860. Il a fallu une longue série d'années, et plusieurs étapes successives avec les vapeurs à raies brillantes, pour que cette idée simple, maintenant évidente, s'impose à l'esprit.

La première éclosion d'une idée même très simple est souvent très lente, et l'histoire des sciences en fournit de nombreux exemples.

L'appareil comporte des modèles très variés; il a en principe deux mouvements : un mouvement relatif de l'image solaire et de la première fente et un mouvement relatif proportionnel de la deuxième fente et de la plaque photographique. Le premier mouvement peut être réalisé, soit en adoptant le mouvement diurne du Soleil, soit en déplaçant la lunette astronomique entière, soit en déplaçant l'objectif astronomique seul ou le spectrographe entier ou sa première fente seule, ce qui, dans chaque cas, est réalisable de plusieurs manières. Le second mouvement doit être proportionnel; mais, dans certains cas particuliers, il est assuré par le premier mouvement, et l'appareil entier ne comporte alors qu'un seul mouvement. Au point de vue mécanique, l'avantage est alors réel, les images obtenues étant plus régulières, et Hale a préconisé un dispositif à un seul mouvement, qui a été reproduit plusieurs fois. Mais les dispositifs à un seul mouvement exigent certaines conditions optiques et mécaniques qui sont parfois gênantes et les font alors rejeter.

La discussion des avantages respectifs de tous les types divers, très nombreux, est d'importance secondaire, et trop longue pour être exposée dans cette courte Notice. Il suffira de remarquer que le choix du meilleur type à adopter dépend du but à poursuivre et des

conditions de l'observation. D'une manière générale, les raies fines du spectre exigent des spectrohéliographes très grands, qui même peuvent atteindre des dizaines de mètres et aussi des spectrographes doubles et à trois fentes qui éliminent la lumière diffusée dans l'appareil. Un autre spectrohéliographe indiqué par Deslandres est à trois fentes, dont une multiple et isole non plus une seule radiation, mais plusieurs radiations à la fois. Il convient, en particulier, pour la recherche des particules.

Deux ordres principaux de recherches. Enregistrement continu des éléments variables du Soleil. Spectrographe enregistreur des vitesses radiales. — Les méthodes nouvelles assurent donc l'étude complète des deux premières couches atmosphériques et dans la demi-sphère entière tournée vers la Terre. Leur application intégrale exigera un travail énorme, à cause du très grand nombre de raies différentes à isoler. Toutes ces raies, il est vrai, ne doivent pas être également intéressantes, et une sélection entre elles est nécessaire; mais cette sélection comporte une reconnaissance préalable qui est très longue, et est à peine commencée.

Dès à présent, on peut cependant distinguer deux ordres principaux de recherches à poursuivre. Une première branche importante est l'étude complète et continue des variations de l'atmosphère solaire, variations qui sont toujours plus grandes que celles de la surface, et sont

notables surtout autour des taches. Depuis 300 ans, les taches sont observées, sans un résultat décisif sur leur origine; l'étude, il est vrai, a porté seulement sur les phénomènes de la surface solaire, et l'atmosphère au-dessus, qui peut avoir un rôle capital, restait inaccessible. La lacune est maintenant comblée. Comme les perturbations atmosphériques, non exactement proportionnelles d'ailleurs à l'ombre de la tache (*voir* p. 28), peuvent être la cause première d'une action directe sur les aimants terrestres, il faut les relever avec soin; et, pour cette recherche, les images avec les raies brillantes H et K sont de beaucoup les plus convenables. Ces raies sont les plus hautes de l'atmosphère solaire; et, de plus, étudiées dans le laboratoire, elles sont extraordinairement sensibles à toutes les variations de pression et d'état électrique. Elles apparaissent comme le meilleur indice de tous les changements dans l'atmosphère solaire.

C'est pourquoi, déjà en 1893, Deslandres, après avoir réclamé l'enregistrement de tous les éléments variables du Soleil, a proposé tout particulièrement l'enregistrement continu : 1° de la surface par la photographie ordinaire; 2° de la chromosphère et des images du calcium avec le spectrohéliographe et les raies H et K; 3° des vitesses radiales de la chromosphère avec les mêmes raies et les spectro-enregistreurs spéciaux décrits ci-dessus (p. 97).

Un enregistrement absolument continu est

réalisable mais coûteux, et il semble suffisant de l'employer, seulement lorsqu'une grosse tache passe au centre du Soleil, ou lorsqu'une perturbation magnétique est signalée par des avertisseurs spéciaux qui seraient à organiser.

L'enregistrement continu n'a pas encore été réalisé, mais il faut signaler le premier spectrographe enregistreur des vitesses radiales, mis en service à Paris en 1894. Cet appareil, qui est à grande dispersion, décèle les mouvements radiaux qui, probablement, ont une importance toute spéciale dans la question qui nous occupe; il décèle aussi nettement les trois couches superposées de la vapeur de calcium et toutes les variations de ses couches. Il est extrêmement précieux, et, pour l'étude des perturbations autour des taches, il est assurément plus utile que le spectrohéliographe ordinaire ou spectrographe enregistreur des formes.

Pour l'étude complète des variations atmosphériques, on pourra joindre aux appareils précédents : 4° un spectrographe à grande dispersion qui enregistre la composition chimique, souvent variable, des vapeurs au-dessus et autour de la tache; 5° un spectrographe spécial, à déterminer, capable de déceler les amas de particules et surtout les amas de condensation dans le voisinage de la tache solaire.

Une autre branche de recherches, non moins curieuse, est l'étude de la répartition des diverses vapeurs à la surface du Soleil et de leurs intensités. Le sujet est vaste, et comprend l'exa-

men et la comparaison des images fournies par les raies noires extrêmement nombreuses. Il exigera, comme on l'a déjà remarqué plus haut (p. 119), l'emploi de spectrographes de grandes dimensions et d'appareils astronomiques puissants.

Résultats généraux depuis 1892. *Permanence du réseau chromosphérique. Etude de l'atmosphère autour des taches.* — Dans les premières années, de 1892 à 1904, le nombre des observateurs engagés dans ces recherches a été minime. On peut citer seulement Hale, à Chicago, de 1891 à 1895, et à l'observatoire, Yerkes, de 1896 à 1904; Deslandres, à Paris, de 1891 à 1897, et ensuite à Meudon, et enfin Evershed, en Angleterre, dans son observatoire privé de Kenley.

Les résultats de Paris et Meudon seront présentés les premiers. Ils ont été obtenus avec des appareils astronomiques de petite dimension, non construits spécialement pour cet usage, un sidérostat de Foucault et un objectif de $0^m,12$ à Paris, un sidérostat polaire et un objectif de $0^m,20$, non achromatisé pour la photographie, à Meudon. Les spectrographes, à deux mouvements rectilignes et montés sur une même table, sont : *a.* un spectrohéliographe ou enregistreur des formes à un seul prisme et de petite dispersion, qui fournit avec une grande netteté l'image des couches moyenne et basse du calcium, c'est-à-dire de la chromosphère et de la couche ren-

versante entière ; *b.* un spectro-enregistreur des vitesses radiales ou des sections successives, à réseau et de grande dispersion, qui est signalé au paragraphe précédent, et qui sépare les trois couches du calcium. L'image finale avait 50^{mm} à Paris et 90^{mm} à Meudon.

Dans l'intervalle de 12 ans, de 1893 à 1904, qui s'étend d'une année de maximum à une année de maximum de la période suivante, on a fait journellement, toutes les fois que le temps l'a permis, au moins une épreuve de la chromosphère entière, dans le but de reconnaître les variations générales de cette couche avec la période des taches.

Or, les grandes plages brillantes de la chromosphère, qui sont en accord général de forme avec les facules de la surface, ont varié avec ces dernières et ont disparu avec elles. Par contre, le réseau des petites plages brillantes, appelé par Hale, au début, réseau faculaire et par Deslandres réseau chromosphérique, persiste même en plein minimum. Déjà, en 1897, alors que Tacchini annonçait la disparition des petites facules aux pôles, les petites plages brillantes se maintenaient à ces mêmes pôles et ont toujours été présentes. Le réseau chromosphérique est donc indépendant des facules et dans une large mesure aussi de la période solaire.

Le même appareil a fourni des images de très belles protubérances (*voir* la figure 7, p. 84), et en 1899 des épreuves très nettes qui montrent

la division des plages brillantes de la chromosphère en grains brillants.

D'autre part, le spectro-enregistreur des vitesses, organisé en 1894, a fourni quelques résultats curieux sur les mouvements de la chromosphère haute et moyenne, sur l'absence de la couche renversante et de la chromosphère basse au-dessus des taches (août 1894) (1). Mais, après ces premiers essais, à cause de l'insuffisance du personnel, l'appareil a été peu employé, d'autant que le réseau, qui était le seul du Laboratoire, a été consacré souvent à d'autres usages. En 1904, il a été réorganisé et remis en service régulier, surtout pour l'étude des perturbations autour des taches, qu'il décèle mieux que le spectrohéliographe. Il sépare en effet nettement les trois couches superposées du calcium, dont les raies ont des largeurs très variables (2) qui augmentent avec l'épaisseur des couches, et il décèle en outre leurs vitesses relatives. On a pu distinguer ainsi autour des taches

(1) Cette absence de la chromosphère au-dessus de certaines belles taches est aussi révélée par les épreuves du spectrohéliographe, lorsque la tache passe au bord.

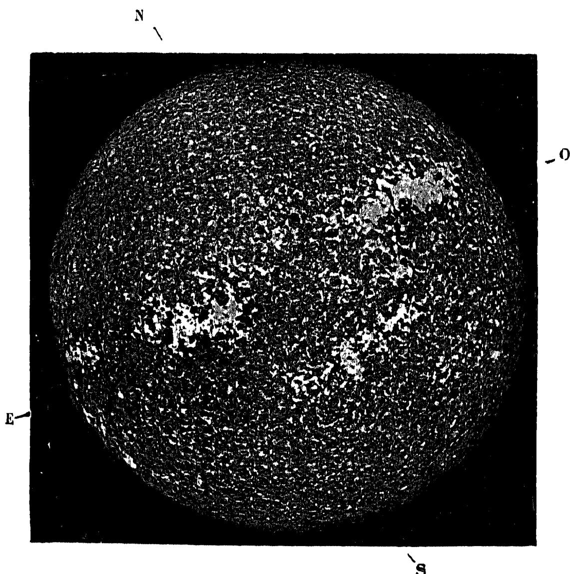
(2) La variation notable en largeur de la raie brillante et de la raie noire centrale est un inconvénient grave pour le spectrohéliographe dont la fente, au contraire, a une largeur constante. Le désaccord est d'autant plus sensible que la dispersion est plus grande.

Fig. 11.

Enregistrement des formes.

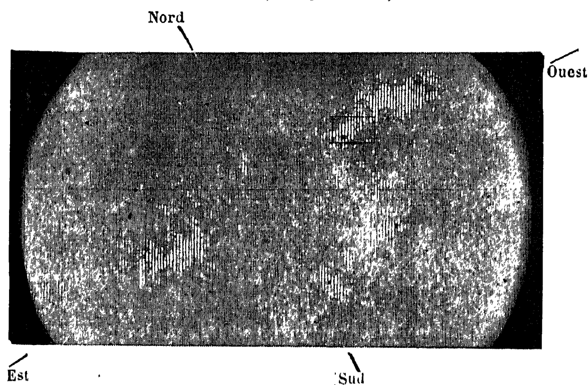
Chromosphère du disque,

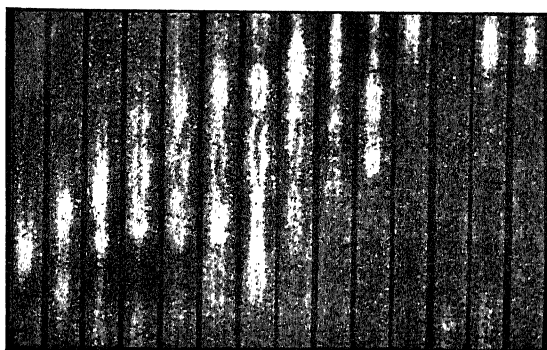
le 20 juillet 1905, de $17^h 18^m$ à $17^h 26^m$.



Obtenue à Meudon avec un sidérostat polaire, un objectif de $0^m,20$ et un spectrohéliographe de faible dispersion à un prisme, qui isole la raie K du calcium. L'épreuve originale a été réduite de 88^{mm} à 62^{mm}. L'épreuve montre bien, d'une part, les grandes plages brillantes qui correspondent aux facules de la surface et sont notablement plus étendues qu'elles et, d'autre part, les petites plages, appelées souvent *flocculi*, qui forment le réseau chromosphérique.

Fig. 12. — Enregistrement des vitesses radiales et séparation nette des trois couches du calcium avec un spectrographe à réseau de grande dispersion et des sections successives ; le 20 juillet 1905, de 10h 25m à 10h 45m.





Agrandissement du petit rectangle de l'image au-dessus. La raie brillante K double et la raie noire centrale des deux sous-couches de la chromosphère sont visibles nettement, dans chaque section, au-dessus des facules.

des zones successives où la couche supérieure du calcium a des épaisseurs croissantes, et des mouvements caractéristiques.

Les images 11 et 12, ci-devant, reproduisent les épreuves des formes et des vitesses, obtenues avec la raie K du calcium, le 20 juillet 1905 à Meudon, et réduites de 88^{mm} à 62^{mm}. L'épreuve des formes [1], faite à un moment favorable, est riche en détails. L'épreuve des vitesses, incomplète parce que l'appareil est encore insuffisant, et représentée trop claire, est formée de petits spectres juxtaposés, qui décèlent les vitesses radiales et les formes générales des vapeurs. Pour bien montrer ce que sont ces épreuves spéciales, on a représenté au-dessous une petite portion (près d'une tache), très agrandie, dans laquelle on distingue la raie double brillante et la raie noire centrale. Or la raie noire et aussi la raie brillante, en certains points, sont tordues et déplacées, ce qui annonce une perturbation autour de la tache. On comprend par cet exemple l'utilité d'un enregistrement continu.

---

[1] L'épreuve des formes est l'image de la chromosphère entière obtenue avec la raie K_2 du calcium. Il eût été bon de publier en même temps l'image de la couche renversante entière par l'isolement de la raie K_1, et aussi l'image de la surface, obtenue le même jour par la photographie ordinaire. Mais les détails de ces deux images, qui sont faibles, eussent été mal reproduits sur du papier ordinaire.

Granulation de la chromosphère. Particularités des images de l'hydrogène et du fer. — Hale, à Chicago, organise un premier spectrohéliographe, à deux mouvements rectilignes, sur un équatorial de $0^m,30$, à l'observatoire de Kenwood et obtient les premières épreuves de la chromosphère entière. Puis, en 1896, il se porte à Williams Bay, pour y fonder un grand observatoire, l'observatoire Yerkes, qui contient la plus grande lunette du monde ($1^m,05$ d'ouverture et 20^m de distance focale). Cet établissement a produit des travaux remarquables dans toutes les branches de l'astronomie physique, et, vers 1902, il dirige les ressources exceptionnelles dont il dispose vers les nouvelles méthodes solaires. Hale fixe à son grand équatorial de 20^m un spectrohéliographe nouveau, de grandes dimensions, et capable d'utiliser l'image solaire large de 19^{cm} projetée sur sa première fente. Le spectrohéliographe est à deux mouvements, dont l'un est rotatif et l'autre rectiligne, et organisé de manière à avoir des dispersions différentes, grâce à des combinaisons variées de prismes et de réseaux. La concentration de lumière sur l'image est considérable.

Hale obtient de magnifiques images, récemment publiées; une de ces images montre nettement la division en grains de la chromosphère, plus nettement que les épreuves de Meudon de 1899. Cette granulation est un fait important, qui doit être rapproché de la granulation bien constatée de la surface solaire. Il reste seulement

à vérifier que les grains des deux couches sont en accord, ce qui est *a priori* probable.

Puis, avec son appareil très lumineux, il aborde les images avec les raies noires du spectre, et signale une particularité curieuse des images de l'hydrogène. Ces images montrent parfois au-dessus des facules, non plus des plages brillantes, mais des plages noires, relativement noires par rapport au fond. Le phénomène a été attribué à de grandes masses d'hydrogène froid, à des protubérances qui absorbent la radiation des couches plus basses; mais, quelle que soit l'explication, le fait en lui-même est très intéressant, et montre une fois de plus que l'étude des raies noires réserve des surprises.

Deslandres, aidé par d'Azambuja, a signalé aussi récemment une particularité des images du fer. Certaines raies du fer, isolées tout entières en 1894 avec un spectrohéliographe de faible dispersion, montrent des plages brillantes à l'emplacement des facules. Le résultat est un résultat global pour l'ensemble de la raie. Or, avec une forte dispersion, la raie se divise en trois parties : une raie centrale très noire et deux parties moins noires, dégradées de chaque côté. Si on les isole successivement avec le spectrohéliographe, les parties dégradées, qui représentent la couche basse de la vapeur, donnent les plages brillantes des facules; mais la partie centrale, qui correspond aux couches hautes, fournit une image différente. Le spectro-

héliographe peut déceler toutes les couches successives d'une même vapeur, lorsque ces couches se distinguent par des largeurs différentes de la raie noire; mais, pour cette recherche délicate, il doit avoir de grandes dimensions et être uni à un appareil astronomique puissant.

Enfin, dans la même période, le spectre variable des taches solaires a été relevé avec soin par Fowler, Cortie, Mitchell et Hale. Même ce dernier, aidé de W. Adams et G. Gale, a retrouvé récemment dans un arc électrique faible quelques particularités des radiations émises par les taches.

Extension récente des recherches. Congrès international des études solaires. — Cependant la valeur des nouvelles méthodes pour l'étude complète du Soleil était nettement mise en relief; et, dans ces deux dernières années, l'application de ces méthodes a pris une grande extension. Plusieurs autres observatoires se sont organisés pour la photographie journalière de la chromosphère entière, et il faut citer en particulier les observatoires de South Kensington en Angleterre, de Kodaïkanal aux Indes, de Potsdam, de Tortose, de Catane, de Mexico, etc.

En même temps, Hale a abandonné l'observatoire Yerkes où les conditions atmosphériques n'étaient pas assez favorables, et, en 1904, il est allé fonder un nouvel observatoire (le troisième depuis quinze ans), plus spécialement solaire, au

mont Wilson, en Californie, à l'altitude de 2400^{m}. La pureté du ciel, justement célèbre en Californie, et la grande élévation de la station, sont des avantages précieux. L'installation astronomique est d'ailleurs grandiose; car la Carnegie Institution, qui a pris la charge des dépenses, a déjà mis à la disposition du fondateur plus de 1500000^{fr} (1). L'observatoire est dès à présent le plus complet et le mieux organisé pour toutes les recherches solaires. Il faut admirer en cette circonstance et l'activité maîtresse du fondateur et la générosité des riches Américains qui font un si noble usage de leur fortune.

En France, le progrès est beaucoup plus lent, les ressources en argent, matériel et personnel étant aussi beaucoup plus faibles. Cependant, l'année dernière, l'observatoire de Meudon a pu obtenir des Chambres (2) un crédit, qui est

---

(1) L'institution Carnegie a accordé récemment une forte subvention au professeur Turner, pour la création d'un bureau de mesures, spécialement destiné aux recherches solaires. Le bureau sera adjoint à l'Observatoire que Turner dirige à Oxford.

(2) Le crédit a été accordé grâce au concours de M. Massé, rapporteur du budget de l'Instruction publique à la Chambre; de M. Cochery, président de la Commission; de M. Baudin, rapporteur général; de M. Laurent, directeur général aux Finances; de MM. Boudenoot et Lintilhac, successivement rapporteurs au Sénat, qui ont compris immédiatement l'importance des recherches solaires. Même M. Cochery a exprimé ainsi son opinion : « Oui, nous ferons

relativement faible, puisqu'il est inférieur à 100000^{fr}, mais qui permettra à notre pays de faire encore une certaine figure dans le concours qui est ouvert entre les nations.

La question a été portée, en effet, depuis 1904, sur le terrain international, qui est son vrai terrain, puisque le Soleil luit également pour tout le monde. La tâche à remplir est énorme, comme on l'a remarqué plus haut; elle ne peut être menée à bien que par le concours et l'union de tous les observateurs solaires. Cette conclusion a été présentée depuis longtemps déjà par l'auteur de cette Note, qui, même, a cherché en 1900 à organiser une union internationale; mais malheureusement, pendant notre exposition, aucun congrès d'astronomie physique n'a été réuni.

De leur côté, les Américains, en 1904, ont profité de la grande exposition de Saint-Louis, pour former un congrès spécial d'études solaires; et, sous l'impulsion de Hale, ils ont fondé les bases d'une Union internationale qui a un bureau permanent, et doit se réunir tous les deux ou trois ans dans une ville différente. Le second congrès de recherches solaires a eu lieu à Oxford en 1905, et le troisième doit se réunir cette année à Meudon.

Le but de ces congrès est de déterminer les questions auxquelles la coopération peut s'ap-

---

quelque chose pour le Soleil, qui est notre maître à tous. »

pliquer d'une manière utile, et de fixer ensuite pour chacune des règles simples, qui, suivies par tous, assurent la continuité des observations en même temps que leur similitude et leur rapprochement final. Ce résultat peut être obtenu dans un grand nombre de cas, en laissant largement le champ libre à l'initiative individuelle.

Le dernier Congrès d'Oxford, en particulier, a porté son attention successivement : 1° sur la mesure de la constante solaire et de ses variations avec le pyrhéliomètre de Knut Angström, adopté comme étalon ; 2° sur l'étude continue de l'atmosphère solaire avec les divers spectrographes enregistreurs ; 3° sur le spectre des taches solaires ; 4° sur la détermination des étalons de longueur d'onde par la méthode interférentielle de Pérot et Fabry.

L'année prochaine, la coopération dans ces quatre ordres de recherches aura déjà porté quelques fruits, et il sera possible d'avoir sur elle une première opinion ; mais, comme elle correspond à un besoin réel, l'organisation essayée ou une organisation similaire finiront toujours par s'imposer.

L'*Annuaire* du Bureau tiendra ses lecteurs au courant des résultats obtenus et des décisions prises par les congrès successifs.

RÉSUMÉ GÉNÉRAL.

En terminant, il convient de jeter un coup d'œil d'ensemble sur toutes ces recherches et de résumer brièvement nos connaissances sur la constitution physique du Soleil.

L'analyse spectrale fournit les indications les plus précieuses; elle permet d'affirmer que le Soleil est fait de la même matière que la Terre, cette matière étant portée d'ailleurs à une température beaucoup plus haute; c'est ainsi que les vapeurs en contact direct avec la surface sont, d'une manière générale, les vapeurs des éléments chimiques qui composent l'écorce même de la Terre.

La surface ou photosphère, toujours d'après les données spectrales, est ou solide ou liquide; or, elle ne peut être un solide compact, comme la surface terrestre, puisque ses diverses parties ont des vitesses de rotation différentes. Elle est une mer liquide, ou plutôt une mer de nuages, formée de particules incandescentes liquides et solides, en suspension dans un mélange de vapeurs et de gaz. La seconde alternative est, en effet, de beaucoup la plus vraisemblable; car, seule, elle explique bien les grains de la surface, incessamment variables, et les grandes inégalités, taches et facules, qui persistent dans la même région pendant plusieurs jours; seule, elle assure le transport ra-

pide de la chaleur, du noyau interne vers la surface, de manière à compenser les pertes énormes et continues par le rayonnement. Les vapeurs chaudes intérieures s'élèvent sans rencontrer d'obstacles, et, arrivées à la surface, se refroidissent, se condensent et, transformées en gouttelettes, redescendent. Or, les particules liquides ou solides, ainsi formées, ont la propriété bien connue d'avoir un pouvoir émissif très grand, beaucoup plus grand, à température égale, que la vapeur qui leur a donné naissance. D'où le très grand éclat de la photosphère et la faiblesse relative de la lumière émise par les vapeurs environnantes.

Toutes les particularités de la surface s'expliquent aisément, et Young, qui a écrit un ouvrage fort estimé sur le Soleil, a conclu ainsi : « Il est presque impossible de douter que la surface solaire soit un nuage de condensation. » Ce nuage est en général comparable à nos cumulus, qui ont des bords nets et bien délimités, et sont formés de gouttelettes d'eau liquide. L'origine chimique des gouttelettes solaires, d'autre part, est inconnue, mais elles sont dues évidemment aux corps les plus réfractaires du Soleil, qui peuvent être plus réfractaires que le carbone [1], le plus difficile à volatiliser de tous les corps terrestres.

---

[1] Un changement dans la nature chimique de ces gouttelettes, qui semble possible, modifierait la tem-

Au-dessus du nuage solaire est l'atmosphère proprement dite, dont les trois couches superposées ont été révélées par les éclipses au bord solaire extérieur. La disposition des couches basse et moyenne, d'autre part, est décelée journellement par les méthodes nouvelles décrites au précédent Chapitre.

Or, les trois couches atmosphériques sont aussi, comme la surface, constituées par un mélange de gaz et de particules; mais les particules sont beaucoup moins brillantes et beaucoup plus espacées. La couche basse, dite renversante, comprend les vapeurs les plus lourdes, ou plus faciles à condenser, qui sont à rapprocher de la vapeur d'eau de notre atmosphère; et la couche moyenne ou chromosphère présente les gaz légers, tels que l'hydrogène et l'hélium, assimilables à nos gaz permanents, azote et oxygène (1). Les deux couches ont aussi des particules, mais encore mal reconnues; et, dans leur ensemble,

---

pérature de l'astre et la chaleur reçue par la Terre. On peut expliquer ainsi certaines périodes géologiques, très différentes de l'époque actuelle.

(1) Les hauteurs relatives des couches correspondantes dans les atmosphères solaire et terrestre sont comparables. Pour la couche renversante, la hauteur est environ la millième partie du rayon solaire et, avec la chromosphère en plus, la centième partie. Or, sur la Terre, dont le rayon a 6400^{km}, les couches correspondantes s'élèvent à 6^{km}, 400 et 64^{km}; la petite couche comprend sensiblement toute la vapeur d'eau de l'atmosphère, et la grande couche l'atmosphère entière.

elles sont comparables à notre atmosphère, ou à la partie de cette atmosphère que nous pouvons reconnaître.

La couche haute ou couronne, d'autre part, est un phénomène nouveau, qui ne correspond à rien de connu sur la Terre; elle est constituée presque exclusivement par des particules. Ses formes rayonnantes et la présence des particules s'expliquent fort bien par la force répulsive émanée de l'astre qui est la pression de radiation. Le rayonnement intense des particules de la surface, condensées à haute température, repousse les particules de l'atmosphère condensées à température plus basse; et ces dernières particules, qui, pour des raisons trop longues à développer, doivent être électrisées, s'éloignent du Soleil avec une vitesse croissante, si elles sont suffisamment petites, et forment en premier lieu les rayons de la couronne.

De plus, la chromosphère émet probablement à sa partie supérieure des rayons cathodiques formés par des particules beaucoup plus petites que les précédentes, électrisées négativement et animées de vitesses beaucoup plus grandes, qui sont comparables à la vitesse de la lumière. Le Soleil aurait ainsi, outre son rayonnement lumineux ordinaire, une autre sorte de rayonnement qui est une émission de particules (1) et dont les

---

(1) L'émission des particules a été admise par Newton et ses successeurs pour expliquer la lumière ordinaire, puis abandonnée après le triomphe des

propriétés ont été recherchées surtout par Arrhénius. C'est à ces particules, petites et très petites, dont le rôle, ici seulement indiqué, peut être considérable, que l'on attribue l'action du Soleil sur le magnétisme terrestre. Cette explication est assurément très plausible.

En réalité, si l'on excepte la couronne, le Soleil et la Terre, au premier abord jugés très dissemblables, ont de multiples points communs, et le grand écart de leurs températures ne s'oppose pas à l'accord général que l'observation révèle. Si les différents corps prennent les états gazeux, liquide et solide à des températures très variées, ils passent tout au moins d'un état à un autre de la même manière et en obéissant aux mêmes lois. C'est pourquoi une mer de nuages, observée en ballon ou d'un pic élevé, avec les mouvements verticaux des particules, avec les fluctuations rapides de sa surface liées aux vents inférieurs et supérieurs, offre un phénomène tout semblable à celui de la surface et de l'atmosphère solaires. L'assimilation est plus complète à l'heure de la nuit, lorsque le nuage, soustrait à la chaleur solaire, rayonne sa propre chaleur vers le ciel. Le nuage terrestre est à quelques degrés au-dessus de zéro, et le nuage

---

ondulations. Elle est invoquée de nouveau pour d'autres phénomènes. Le Soleil (et probablement aussi tous les corps) émettrait donc à la fois les deux rayonnements, le rayonnement par ondulations et celui par émission de particules.

solaire, d'après les mesures les plus dignes de foi, dépasse 6000°; mais, ce point mis à part, les deux phénomènes apparaissent les mêmes.

Il faut faire cependant quelques réserves. Le nuage brillant, qui est la photosphère, entoure complètement le Soleil, alors que la mer de nuages terrestre ne recouvre qu'une partie de la surface (1).

De plus, les deux atmosphères sont étudiées dans des conditions très différentes, qui rendent une comparaison complète et précise assez difficile. L'observateur, à un moment donné, ne découvre et ne relève qu'une portion restreinte de notre atmosphère qui même, dans le sens de la hauteur, est limitée au voisinage de la surface. Avec le Soleil, au contraire, l'observateur embrasse d'un coup d'œil l'atmosphère entière dans la demi-sphère tournée vers la Terre, et les appareils décrits au dernier Chapitre lui fournissent en quelques minutes un résultat d'ensemble et pour les diverses couches. Aussi, à certains égards, l'atmosphère solaire peut être mieux connue que l'atmosphère terrestre, et Faye estimait que l'étude du Soleil devait fournir des indications utiles à la Météorologie terrestre. L'atmosphère du Soleil est la seule pour laquelle nous avons à la fois une vue générale et les détails des couches successives (2).

---

(1) On estime que, sur la Terre, la moitié de la surface est recouverte par les nuages.

(2) On admet, en général, que la planète Jupiter

Cependant la matière solaire, formée de gaz en partie condensables et de particules (le noyau central mis à part), est dans un état qui se prête aux mouvements et changements les plus divers. Elle est, en effet, incessamment agitée et modifiée; le rayonnement de chaque partie est variable, et aussi peut-être le rayonnement total. Quels sont donc les résultats généraux déjà obtenus sur ces variations?

Ils sont encore incomplets sur beaucoup de points; car l'étude, en réalité, est seulement commencée. Les méthodes qui assurent la reconnaissance complète sont connues, mais ne sont pas encore appliquées avec l'ampleur qui est nécessaire: l'enregistrement continu qui s'impose n'est pas encore organisé.

On peut juger l'état des choses par les taches dont la nature et la cause première, comme on sait, ne sont pas encore déterminées. Deux théories sont en présence; l'une attribue la tache à une éruption, à une cause interne; l'autre fait intervenir une cause extérieure, et c'est ainsi que Faye expliquait le phénomène par de grands

---

nous présente une image de nuages et donc aussi une vue d'ensemble de son atmosphère; et déjà, dans cet ordre d'idées, la planète a été rapprochée du Soleil et de la Terre. Mais la nature, la hauteur de la couche visible, l'existence d'autres couches ou d'une surface liquide ou solide restent indéterminées. De plus, la planète est beaucoup plus éloignée que le Soleil.

mouvements giratoires de l'atmosphère, analogues à nos cyclones. Or, jusqu'à ces dernières années, le choix entre les théories était impossible ; car l'atmosphère échappait à l'observation. L'astronome était comparable à un marin qui devait expliquer les agitations de la mer sans connaître le régime des vents au-dessus d'elle. La lacune est maintenant comblée, et déjà une première étude a décelé des faits curieux sur la disposition et les mouvements des couches atmosphériques qui entourent la tache.

La question ne pourra donc être élucidée que par une étude continue, étendue au Soleil entier ; la tache n'est qu'une petite partie d'un ensemble de perturbations qui s'étendent fort loin autour et au-dessus d'elle, qui la précèdent et lui survivent, et sont plus utiles à connaître que les petits détails de sa structure (1).

D'autre part, un fait général et important se dégage des premières recherches : c'est la liaison étroite des couches successives entre elles et avec la surface, liaison qui est frappante sur les épreuves de la couche renversante et de la chromosphère entières (2). Les parties hautes et

---

(1) Cette remarque n'est pas une critique des dessins de taches, très nombreux, comme on sait, dont l'utilité est incontestable. On a rappelé seulement que la tache n'est qu'une partie du domaine très vaste qui est à explorer. Dans notre pays, Moreux, en particulier, a publié de beaux dessins de taches solaires.

(2) Sur la Terre, le phénomène de l'électricité

brillantes des deux couches correspondent aux parties hautes et brillantes de la surface, et, très probablement, les jets coronaux participent à cette dépendance. Les particules, électrisées ou non, qui sont repoussées par la pression de radiation, doivent être plus nombreuses au-dessus des facules [1], là où les vapeurs, étant plus hautes, se condensent plus facilement ; et le bombardement de particules, qui est alors particulièrement violent, explique aisément l'action directe qui serait exercée sur la Terre par les taches et facules à leur passage près du centre du Soleil.

Cette liaison de toutes les couches s'accorde aussi très bien avec un autre fait, général et important, qui est la variation simultanée des taches et de toutes les dépendances solaires pendant la période undécennale. La matière du

---

atmosphérique offre une particularité qui peut être rapprochée de la liaison des couches atmosphériques solaires avec la surface. Le champ électrique terrestre est plus intense au-dessus des pics et des montagnes. De même, dans le Soleil, si l'on rapporte l'illumination de la chromosphère à une cause électrique (*voir* p. 89), le champ électrique apparaît plus fort au-dessus des parties élevées de la surface.

(1) Marchand, en France, a annoncé que les orages magnétiques terrestres étaient en relation non avec les taches, mais avec les facules. Le fait, il est vrai, a été contesté par les astronomes anglais et devra être examiné de nouveau.

Soleil entier subit une grande oscillation, à laquelle participe probablement le rayonnement total, et qui même s'étend dans une certaine mesure à la Terre et aux planètes.

Les causes de cette oscillation et celles qui provoquent la formation des taches, des facules et vapeurs connexes, ne sont pas encore exactement connues; elles sont liées vraisemblablement aux causes générales qui assurent la permanence du rayonnement solaire et l'afflux constant de chaleur du noyau central vers la surface. Toutes ces causes restent mystérieuses et ne se dégagent pas nettement de l'examen des faits auxquels cette notice est spécialement consacrée. Plusieurs hypothèses ont été présentées, et celles qui assurent une explication générale seront exposées dans une Note ultérieure.

Le rapprochement avec l'atmosphère terrestre, présenté ci-dessus avec détails, est instructif, puisqu'il ramène plusieurs phénomènes solaires à des phénomènes simples, qui nous sont familiers; il conduit aussi à une remarque qui est utile. Les particules en suspension dans notre atmosphère ont un rôle considérable : leur proportion plus ou moins forte règle en grande partie la quantité de chaleur et surtout de lumière solaire qui arrive jusqu'à nous. Or, dans le Soleil, les particules des couches atmosphériques basse et moyenne doivent avoir une influence aussi grande; et c'est à elles que l'on peut rapporter en partie les variations accidentelles, récem-

ment annoncées, du pouvoir absorbant de l'atmosphère solaire et du rayonnement total de l'astre. Leur étude, jusqu'ici négligée, est donc nécessaire; elle est difficile, il est vrai, et elle exige des appareils compliqués et coûteux; mais il faut l'organiser. Elle se relie d'ailleurs à des recherches également nécessaires sur les vapeurs des nombreuses raies noires, sur les perturbations autour des taches et facules, sur le pouvoir absorbant de l'atmosphère solaire, sur la mesure du rayonnement total, etc.

La tâche qui s'impose aujourd'hui à l'astronome solaire est considérable; mais le problème posé a une importance capitale, et intéresse l'humanité tout entière, puisqu'il comporte la reconnaissance de causes générales, de causes cosmiques, qui influent sur tous les éléments terrestres.

Or, la science française n'a pas encore les ressources qui sont nécessaires pour embrasser ce programme qui est vaste, mais seul capable d'assurer une étude complète, et la Note actuelle se termine par un appel aux pouvoirs publics et aux riches particuliers.

FIN.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
39437 Quai des Grands-Augustins, 55.

